EN LOS LIMITES DEL MUNDO FISICO



SEPTIEMBRE 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Radiografía de los Pirineos

La esquiva inteligencia extraterrestre

Música cristalina



FRUTOS DEL GENOMA HUMANO

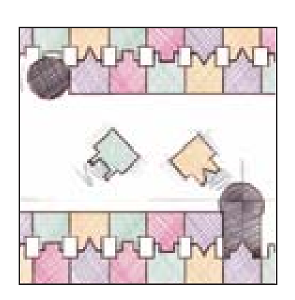


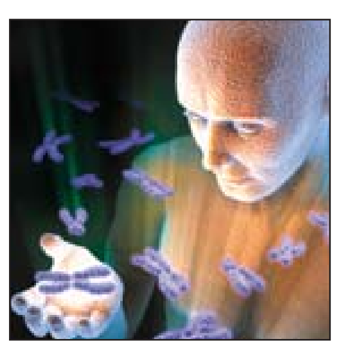


Septiembre de 2000 Número 288

SECCIONES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN





Portada: Jeff Johnson

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Don Dixon
9	Andrew J. LePage
10	Bryan Christie
12	NASA y Space Telescope Science Institute
14-15	Pat Rawlings
16	Slim Films
18-24	Pour La Science
34-35	Julio E. Celis (*izquierda*); Jeff Johnson (*centro*); *Science* (*derecha*); Laurie Grace (*borde*)
36	Sinclair Stammers (*nemátodo*); Andrew Syred (*yeast*)
37	Kay Chernush
38	Laurie Grace en colaboración con Eric Lander
39	Alfred Pasieka (*mosca*); Laboratorio Jackson (*ratón*)
40	Slim Films
42-44	Slim Films
45	Laurie Grace en colaboración con Mark Gerstein, Pat Fleming, David Wheeler y Jennifer Vyskocil
47	Raimond L. Winslow, David Scollan y Physiome Sciences, Princeton, N.J.
48	Paul Harrison y Mark Gerstein (*estructura de proteína*); Julio E. Celis (*2-D gel*)
49	Jeff Johnson
50	Laurie Grace en colaboración con Thomas Neubert y John Yates; Julio E. Celis (*geles*); PE CORP. (*espectrómetro de masas*)
51	Laurie Grace en colaboración con CuraGen
52	Paul Harrison y Mark Gerstein
54-64	Antonio Teixell
66-67	CERN
68	Laurent Guiraud *CERN*
69	Slim Films
70	Slim Films (*arriba izquierda y abajo*); CERN (*arriba derecha*)
71	Slim Films
72	Slim Films (*abajo*); CERN (*arriba*)
73	Georges Boixader *CERN*
75	Matteo Cavalli-Sforza
76-77	Eric A. Soder; Hans Kruck, cortesía de Marie-Claire Blumer-Maillart (*Maillart*)
78	Cortesía de Marie-Claire Blumer-Maillart (*fotografía*); Barry Ross (*ilustración*)
79	Zurich Maillart Archive (*dibujos*); Cortesía de Canton Graubünden (*fotografía*)
80-81	Barry Ross (*arriba*); David P. Billington (*superior izquierda*); Losinger and Co. (*inferior izquierda*); Willy Spiller (*derecha*)
82	E. Oberweiler; David P. Billington; FBM Studio Ltd.
83	Barry Ross (*ilustración*); FBM Studio Ltd. (*fotografía*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Lewin Richter: *Instrumentos musicales de vidrio*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*; Ana M.ª Rubio: *El negocio actual del genoma humano, La fiebre bioinformática* y *Más allá del genoma humano*; Ramón Pascual: *El gran colisionador de hadrones*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

Ciencia y sociedad:

Luis Bou: *Curvas y números* y *Quiralidad, magnetismo y luz*; José M.ª Valderas Martínez: *Demografía*; Manuel Puigcerver: *Luna, mareas y clima*; Victoria Laporta: *Transformación de un mosquito*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
PRODUCTION William Sherman
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

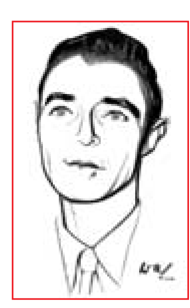
Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

En septiembre de 1950 *Scientific American* publicó un número extraordinario bajo el título de "La era de la ciencia, 1900-1950", en el que diez destacados investigadores de entonces glosaban la situación de los diversos sectores del conocimiento científico.

COMENTARIO INICIAL. «En todos los textos se refleja el doble papel de la ciencia. El propósito y el resultado de la ciencia son el descubrimiento y el conocimiento. Pero también lo son, aunque en un sentido muy diferente, una enorme ampliación de las posibilidades humanas, del poder del hombre para manejar y alterar el entorno en el que vive, trabaja, sufre y muere.» —*J. R. Oppenheimer*, físico teórico y director del Laboratorio Científico de Los Alamos durante la guerra.



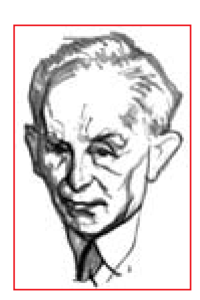
J. R. Oppenheimer

ASTRONOMÍA. «Ninguna de las preguntas que se les plantean hoy a los aspirantes al doctorado tendría sentido para las luminarias de 1900, que se hubieran sentido desconcertados, indefensos y puede que molestos ante investigaciones referentes a los fotomultiplicadores, a la teoría cuántica, las espículas solares, el ciclo del carbono, la expansión del universo, las capas estelares, los focos radioeléctricos, el reflector Schmidt, Plutón, los rayos cósmicos y otros temas habituales. Pero hay que atemperar el orgullo por nuestros progresos pensando cuán por delante de nosotros se hallará la astronomía del año 2000.» —*Harlow Shapley*, director del Observatorio del Harvard College.



Harlow Shapley

FÍSICA. «La diferencia más notable entre la física de 1900 y la de 1950 se resume en la victoria total de la atomística. Se han hecho realidad las especulaciones de los antiguos filósofos griegos y los sueños de los alquimistas. Frederick Soddy y Ernest Rutherford analizaron por primera vez y con unos instrumentos bastante primitivos los procesos de la desintegración radiactiva, descubriendo que consiste en una serie de transformaciones de unos átomos en otros. Cayó así por tierra la creencia en la invariabilidad de los elementos químicos.» —*Max Born*, premiado con el Nobel de física en 1954.



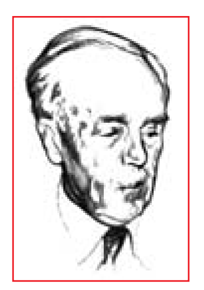
Max Born

QUÍMICA. «El medio siglo que ahora acaba ha visto cómo la química dejaba de ser una gran acumulación informe de conocimientos empíricos para convertirse en una ciencia coordinada. Las nuevas ideas sobre los electrones y los núcleos atómicos se aceptaron rápidamente en química, desembocando en la formulación de una potente teoría estructural, que ha integrado la mayoría de hechos químicos en un sistema unificado. ¿Qué nos traerán los próximos 50 años? Puede esperarse que la química del año 2000 haya conseguido un conocimiento tan penetrante de las fuerzas entre los átomos y las moléculas que sea capaz de predecir la velocidad de cualquier reacción química.» —*Linus Pauling*, premio Nobel de química en 1954 y de la paz en 1962.



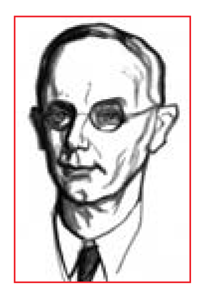
Linus Pauling

GEOLOGÍA. «Una de las controversias finiseculares más importantes y que aún pervive es la cuestión de la estabilidad de los continentes. La hipótesis de la deriva continental, tan aborrecida hoy por muchos geólogos, todavía no ha pasado a mejor vida, habiendo conseguido nuevos apoyos gracias a los datos acumulados sobre la plasticidad de las profundidades de la corteza terrestre. Los teóricos de la deriva sostienen que, sobre tan débil apuntalamiento, los bloques flotantes de la corteza continental podrían desplazarse muchos miles de kilómetros. Pero hasta ahora nadie ha propuesto una explicación convincente sobre las fuerzas que produzcan tal movimiento.» —*Reginald A. Daly*, profesor emérito de geología en la Universidad de Harvard.



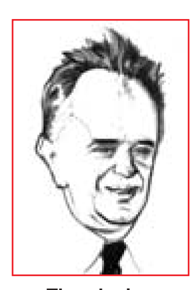
Reginald A. Daly

MATEMÁTICAS. «Durante los últimos cincuenta años los matemáticos puros se han hecho cada vez más rigurosos, mientras que los aplicados gozan en la práctica de absoluta libertad. Por ejemplo, P. A. M. Dirac de Cambridge introdujo su 'función delta', que tiene la propiedad de tener valor infinito en un punto y nulo en todos los demás, a pesar de lo cual su integral es finita. Los aplicados ya la usan de la forma más despreocupada sin incurrir en censuras. Puede que esto sea realmente lo mejor que puede hacerse: háganse primero como sea los descubrimientos, que luego ya se clarificarán lógicamente las cosas.» —*Sir Edmund Whittaker*, uno de los matemáticos más destacados de la primera mitad del siglo XX.



Edmund Whittaker

GENÉTICA. «El impulso más vivo y profundo del hombre es conocerse a sí mismo y su posición en el universo, sondear su propia naturaleza como organismo vivo y las relaciones entre la herencia y el entorno que conforman su desarrollo corporal y mental. El descubrimiento de las leyes básicas de la herencia es una de las conquistas más



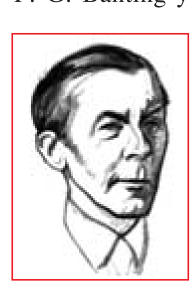
Theodosius Dobzhansky

importantes de la ciencia del siglo XX. La genética se ha convertido en la piedra angular de la biología moderna y con seguridad tendrá un papel primordial en las incipientes técnicas de la ingeniería biológica. Ya ha logrado muchos resultados 'prácticos' mediante mejoras de las razas animales y de las variedades de plantas alimenticias.» —*Theodosius Dobzhansky*, uno de los principales estudiosos de las relaciones entre genética y evolución.

BIOQUÍMICA. «Un movimiento encabezado a principios de siglo por Jacques Loeb, en EE.UU., y Otto Warburg, en Alemania, estaba convencido de que todos los seres vivientes tenían mucho en común. Consecuencia de ello fue que se dejase de lado el estudio exclusivo de los mamíferos como individuos para realizar profundas investigaciones del metabolismo y de la fisicoquímica de las células homogéneas de todos ellos, como huevos de erizos de mar, levaduras, bacterias, corpúsculos sanguíneos, toda célula que pudiera revelar los niveles más fundamentales y universales de los procesos fisiológicos. Mirando hacia el próximo medio siglo, debemos decir claramente que no pueden planificarse ni predecirse los descubrimientos más importantes, que nacen del genio y de la intuición creativa. Las técnicas y la pericia no representan un papel distinto que el que tuvieron cuando Miguel Angel pintó la Capilla Sixtina.» —*Otto Meyerhof*, premio Nobel de fisiología y medicina en 1922.


Otto Meyerhof

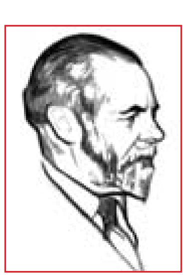
FISIOLOGÍA. «El interés de la fisiología se orienta en el rumbo de la biofísica y la bioquímica. El avance más espectacular en el estudio de las glándulas endocrinas se produjo con el descubrimiento de la insulina, hormona del páncreas, realizado por F. G. Banting y C. H. West en 1922. Consecuencia inmediata de él fue la salvación de miles de vidas. La comprensión del impulso nervioso como una reacción 'todo-o-nada' en cada punto de la fibra nerviosa ha centrado la atención en la membrana superficial como mecanismo activador. La membrana nerviosa está viva y parece sufrir cambios sorprendentes, que ya se encuentran al alcance de la experimentación. Si se logra entenderlos, se habrá dominado una de las propiedades más importantes de las células vivas: su capacidad de reaccionar rápidamente a cambios del entorno.» —*E. D. Adrian*, premio Nobel de fisiología y medicina en 1932.


E. D. Adrian

PSICOLOGÍA. «El desarrollo de la psicología en el medio siglo pasado muestra tres grandes tendencias. La primera es el alejamiento de los enfoques atomísticos a favor del estudio completo del hombre en su conjunto. Se sabe ahora que los elementos de la experiencia pierden todo su sentido cuando se les separa del propio proceso experiencial. En segundo lugar se tiende a considerar al hombre y a su entorno en combinación y no como datos absolutos independientes. La tercera tendencia a considerar es el regreso de los psicólogos al laboratorio, ahora para estudiar problemas de mucho mayor alcance que los que ocupaban a los psicólogos de principios de siglo.» —*Hadley Cantril*, profesor de psicología en la Universidad de Princeton.


Hadley Cantril

ANTROPOLOGÍA. «El logro más importante de la antropología en la primera mitad del siglo XX ha sido la difusión y la clarificación del concepto de cultura, la idea de que los hábitos, las tradiciones, los instrumentos de trabajo y las formas de pensar de una sociedad representan el papel predominante en la conformación del desarrollo de los seres humanos. Lo más destacado de esta ampliación conceptual ha sido el hundimiento de la doctrina del racismo, la injustificada hipótesis de la superioridad racial. Se ha aprendido que los logros y las superioridades sociales descansan abrumadoramente sobre los condicionamientos culturales. La ilusión racista deriva de la incapacidad ingenua para distinguir entre los procesos biológicos fijos y los variables procesos culturales. El nazismo representó su último estallido, desesperado e intransigente, bajo la forma de un movimiento nacional organizado.» —*A. L. Kroeber*, uno de los principales propagadores de la antropología moderna.


A. L. Kroeber

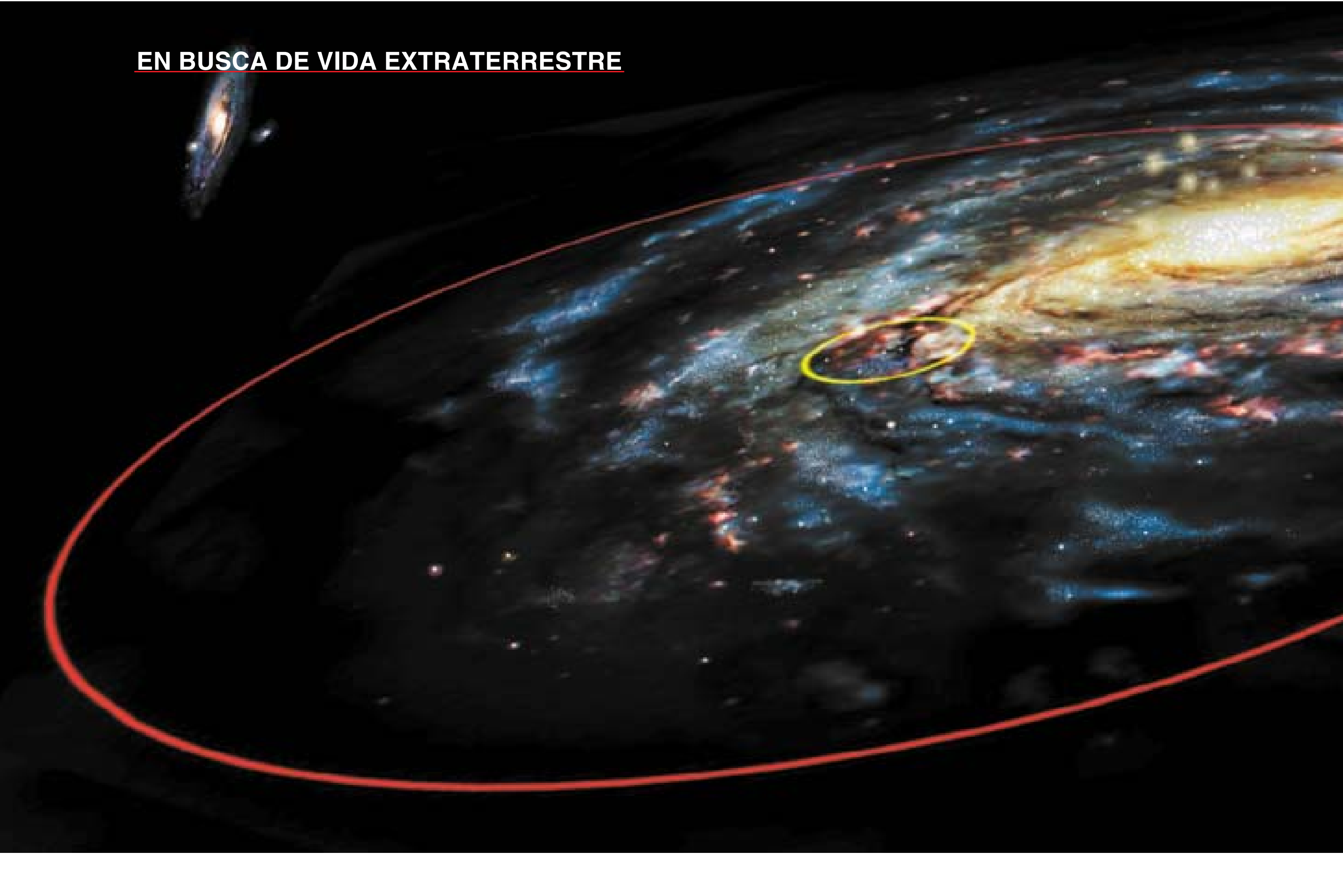
...cien años

FOTOGRABADO. «La generalización del proceso de grabado fotomecánico ha producido una revolución en el mundo editorial. Ha cambiado por completo el carácter de numerosas revistas y publicaciones semanales y ahora es posible incluso para los diarios hacer fotograbados a media tinta en un tiempo que hace pocos años habría parecido cosa de maravilla. La adopción del proceso a media tinta para la ilustración de periódicos y revistas de categoría significó prácticamente el tiro de gracia para el grabado en madera, que dentro de pocos años puede que no se practique más que en las escuelas de arte.»

SEDA DE ARAÑA. «La Escuela Profesional de Tananarivo (Madagascar) está experimentando el empleo del hilo de las arañas productoras de seda (*Nephila magadascarensis*). La 'Halabé' (como los nativos llaman a esa araña) es muy difícil de reproducir, pues la hembra, que es la única que produce el hilo, es tan feroz y voraz que en la mayoría de los casos mata y se come al macho. Las arañas se colocan sobre bastidores en grupos de hasta dos docenas. Las muchachas malgaches tocan el extremo del abdomen de las prisioneras con el dedo y trasladan veinticuatro hilos hasta un gancho, que los unifica, y luego al carrete donde se arrollan.»

...ciento cincuenta años

PISTAS CRIMINALES. «En el caso del asesinato del doctor George Packman, los huesos del cráneo habían sido calcinados arrojándolos a un horno, cuyas cenizas fueron examinadas. Entre ellas se hallaron dientes artificiales. Se efectuó una encuesta entre los dentistas y el doctor Nathan Keep, afamado especialista del lugar, los reconoció al instante, los colocó sobre su molde y en el acto suministró una importante prueba, pues pocos meses antes los había fabricado él mismo proporcionando un ejemplo destacado del valor de la medicina forense.»



¿Habrá otras civilizaciones en el universo? La pregunta ha fascinado durante siglos a la humanidad y, aunque todavía no se le pueda dar una respuesta definitiva, hay datos recientes que han vuelto a ponerla de actualidad. El principal de ellos es la confirmación de que existen planetas fuera de nuestro sistema solar, lo que requirió muchos esfuerzos y varias salidas en falso.

En los últimos cinco años se ha descubierto que son más de tres docenas las estrellas parecidas al Sol que tienen planetas de tamaño semejante al de Júpiter. Aunque todavía no haya aparecido ninguno como la Tierra, se confía en que su número sea cuantioso. Dado que los planetas son necesarios para el origen y la evolución de la vida, estos notables descubrimientos refuerzan ciertamente la generalizada opinión de que la vida se extiende por todo el universo. Los progresos logrados en la comprensión de la historia de la biosfera terrestre respaldan tal creencia, al revelar el ritmo con que aquí se fue asentando la vida. Unas bacterias fosilizadas, descubiertas en 1993 por J. William Schopf en rocas del oeste de Australia de hace 3500 millones de años, son las pruebas directas de vida más antiguas de que se dispone. Estos organismos ya eran bastante avanzados y tendrían que haber pasado por un largo período evolutivo previo. Si el fenómeno vital fuese autóctono de la Tierra, su inicio se produciría hace unos cuatro mil millones de años.

La edad de la propia Tierra no es más que de 4600 millones de años, por lo que el hecho de que la vida apareciese con tal rapidez en la escala de tiempo geológico —probablemente tan pronto como las condiciones se estabilizaron lo suficiente para hacerla posible— induce a pensar que a la naturaleza no le resultó muy difícil dar este paso. El premio Nobel de bioquímica Christian de Duve ha sido más tajante: “La vida está casi obligada a aparecer... siempre que las condiciones físicas sean parecidas a las que se dieron en nuestro planeta hace unos cuatro mil millones de años.” Por tanto hay buenas razones para creer que toda la galaxia sea un hervidero de vida.

¿Se desprende de ello que abunden también las civilizaciones de gran desarrollo técnico? Son muchos quienes sostienen que, una vez aparecida la vida primitiva, la selección natural guiaría su evolución de modo inexorable hacia la inteligencia y el progreso técnico. Pero ¿ha de ser forzosamente así? La posibilidad de que este argumento fuese erróneo la enunció a bombo y platillo el físico nuclear Enrico Fermi en 1950. Si los extraterrestres son tan corrientes, ¿dónde están? ¿No debería ser obvia su presencia? Tal interrogante se conoce con el nombre de paradoja de Fermi.

El problema realmente tiene dos caras. La una es el fracaso de los programas de búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) mediante la detección de transmisiones de radio procedentes de otras civilizaciones. La otra es la falta de pruebas claras de que los extraterrestres hayan visitado nunca la Tierra. La primera vez que se analizó en serio la posibilidad de buscar seres extraterrestres por radioastronomía fue en un famoso trabajo de los físicos Giuseppe Cocconi y Philip Morrison, publicado en la revista *Nature* en 1959. Un año después vino la primera búsqueda real, el Proyecto Ozma. Frank D. Drake y sus colegas del Observatorio Nacio-



¿Dónde están?

A pesar de todo, puede que seamos los únicos habitantes de nuestra galaxia

Ian Crawford

1. NADA nos llega de los posibles seres foráneos con los que pudiéramos compartir la galaxia. La búsqueda de inteligencia extraterrestre ha explorado, al menos parcialmente, la existencia de transmisores de radio comparables a los terrestres que pudieran distar hasta 4000 años luz de nuestro planeta (*círculo amarillo*) y civilizaciones avanzadas del llamado tipo I, alejadas hasta 40.000 años luz (*círculo rojo*). La ausencia de señales comienza a preocupar a muchos investigadores.

nal de Radioastronomía en Green Bank, Virginia Occidental, se mantuvieron dos años a la escucha para detectar señales de dos estrellas cercanas. Desde entonces se han realizado otros muchos experimentos SETI. Actualmente se encuentran en curso una serie de prospecciones refinadas, dedicadas a inspeccionar toda la bóveda celeste y a explorar centenares de estrellas concretas. Pese a toda esta actividad, nunca se ha conseguido la prueba indubitable de que se haya detectado una señal extraterrestre.

Es indudable que se está en la infancia de los programas SETI y la falta de éxito producida hasta la fecha no puede utilizarse como demostración de que no existan civilizaciones fuera de la Tierra. Hasta ahora las investigaciones no han afectado más que a una pequeña fracción del "espacio paramétrico" —es decir, de la combinación de estrellas objetivo, frecuencias radioeléctricas, niveles de potencia y cobertura temporal que los observadores han de explorar antes de extraer conclusiones definitivas—. Pero los resultados iniciales ya comienzan a establecer ciertos límites interesantes sobre la abundancia galáctica de civilizaciones capaces de transmitir por radio.

La paradoja de Fermi se reafirma al examinar algunas de las hipótesis básicas de SETI, en especial el número total de civilizaciones, supervivientes y extintas, que implícitamente supone en nuestra galaxia. Una autoridad en este terreno, Paul Horowitz de la Universidad de Harvard, sostiene que como mínimo ha de haber una civilización radiotransmisora a menos de 1000 años luz del Sol, dentro de un volumen espacial que puede contener algo así como un millón de estrellas del tipo solar. Si esto fuera así, habitarían la galaxia unas mil civilizaciones en total.

Se trata de una cifra importante, por lo que, salvo que tales civilizaciones sean de muy larga duración, habrán surgido y desaparecido muchísimas de ellas durante toda la historia galáctica. (Luego veremos que también plantea problemas el hecho de que su vida fuese realmente larga —es decir, de que lograsen evitar las catástrofes naturales y las autoprovocadas y pudiesen ser detectables con nuestros instrumentos—.) El número de civilizaciones presentes en un momento dado es igual, en términos estadísticos, a su ritmo de formación multiplicado por su tiempo de vida medio. El ritmo de formación puede expresarse aproximadamente por el cociente de dividir el número total de civilizaciones surgidas por la edad de la galaxia, que es del orden de 12.000 millones de años. Si las civilizaciones se formasen a un ritmo constante y viviesen durante un promedio de mil años cada una, tendrían que haber existido algo así como doce mil millones de civilizaciones de refinada técnica en toda la historia de la galaxia para que hoy sobreviviesen mil. Variando los valores adoptados para el ritmo de formación y el tiempo de vida medio se obtienen diferentes estimaciones del número de civilizaciones, pero su magnitud siempre es enorme. Aquí es donde se agudiza la paradoja de Fermi: de entre todos estos miles de millones de civilizaciones ¿no quedarán rastros ni siquiera de una sola?

Migraciones extraterrestres

El problema fue analizado por primera vez en detalle por el astrónomo Michael H. Hart y el ingeniero David Viewing en documentos separados, publicados ambos en 1975. Más tarde lo estudiaron diversos investigadores, sobre todo el físico Frank J. Tipler y el radioastrónomo Ronald N. Bracewell. Su punto de partida común fue la carencia de pruebas claras sobre visitas de extraterrestres (ET) a la Tierra. Se puede opinar lo que se quiera sobre los OVNI, pero lo que sí es seguro es que la Tierra no ha sido conquistada por una civilización de otro planeta, porque ello habría puesto fin a nuestra propia evolución y hoy no estaríamos aquí para contarlo.

No hay más que cuatro maneras imaginables de conciliar la ausencia de ET con la extendida opinión de que abundan las civilizaciones avanzadas en el universo. Puede que los vuelos espaciales interestelares no sean factibles, en cuyo caso los ET nunca habrían llegado aquí aunque

lo hubieran deseado. Tal vez las civilizaciones ET estén explorando activamente la galaxia, pero no hayan dado todavía con nosotros. También pudiera ser que el viaje interestelar fuese factible, pero que los ET hubiesen decidido no emprenderlo. Y, por último, es posible que los ET actuasen, o que actúen todavía, en las proximidades de la Tierra, pero que no quieran interferir en nuestra vida. Si pudiéramos eliminar, una tras otra, estas explicaciones de la paradoja de Fermi, tendríamos que admitir la posibilidad de que fuésemos la forma de vida más avanzada de la galaxia.

La primera explicación falla claramente. Ningún principio conocido de la física ni de la ingeniería descarta los viajes espaciales interestelares. Incluso en estos primeros tiempos de la era espacial ya se conciben métodos de propulsión con los que podría alcanzarse del 10 al 20 por ciento de la velocidad de la luz, lo que permitiría llegar a las estrellas más próximas en unos cuantos decenios [*véase* "Alcanzar las estrellas", de Stephanie D. Leifer, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1999].

La segunda explicación es también problemática por la misma razón. Cualquier civilización que domine avanzadas técnicas de propulsión podría colonizar la galaxia entera en tiempos relativamente cortos, a escala cósmica. Sea, por ejemplo, una civilización que enviase colonos a algunos de los sistemas planetarios más cercanos. Una vez establecidas estas colonias, enviarían a su vez colonias secundarias y así sucesivamente, creciendo exponencialmente el número de colonias. El frente de la onda colonizadora se expandiría con una velocidad determinada por la velocidad de las naves estelares y por el tiempo que cada colonia necesitase para establecerse. Nuevos asentamientos ocuparían rápidamente el volumen de espacio abarcado por este frente de onda (*véase la figura 2*).

Suponiendo una separación típica de 10 años luz entre colonias, que

¿Dónde podrían ocultarse?

La galaxia parece estar desprovista de civilizaciones superiores, pero otras culturas menos desarrolladas pudieran haber escapado a las exploraciones en curso

Andrew J. LePage

Ningún programa SETI ha encontrado hasta ahora ninguna señal de radio cuyo origen extraterrestre pudiera comprobarse. ¿Qué significa este resultado nulo? Dado lo incompleto de las búsquedas cualquier respuesta deberá apoyarse en razones de suma validez. Pero puede llegarse a algunas conclusiones preliminares sobre el número y el grado de capacidad técnica de otras posibles civilizaciones.

El canal radioeléctrico más examinado hasta ahora se centra en la frecuencia de 1,42 gigahertz, que corresponde a la raya de emisión del hidrógeno, el elemento más común en el universo; suponiendo que los extraterrestres tuvieran que escoger alguna frecuencia para atraer nuestra atención, parece natural que eligieran ésta. El diagrama de la página opuesta, primero en su género, ilustra exactamente la profundidad con que se ha explorado el universo en busca de señales de esta frecuencia y de otras cercanas. El no haber detectado jamás señal alguna significa que toda civilización foránea posible está fuera del alcance de nuestros instrumentos o no transmite con la potencia suficiente. El resultado nulo descarta, pues, ciertos tipos de civilizaciones, concretamente las primitivas cercanas a la Tierra y las que, aun siendo avanzadas, se encuentren a distancias muy grandes.

El gráfico cuantifica esta conclusión. En el eje horizontal se representan las distancias desde la Tierra y en el vertical la potencia isótropa radiada equivalente (P.I.R.E.) del transmisor. La P.I.R.E. es esencialmente la potencia del transmisor dividida por la fracción del cielo que cubre la antena. La P.I.R.E. de un transmisor omnidireccional es igual a la propia potencia del transmisor. El radiotelescopio terrestre más potente del planeta está actualmente en Arecibo, Puerto Rico, que puede utilizarse como sistema radar de haz estrecho con una P.I.R.E. de casi 10^{14} watt.

La P.I.R.E. puede dar una tosca indicación del nivel técnico de una civilización avanzada, según un esquema ideado por el precursor ruso de SETI, Nikolai S. Kardashev, a principios de los años sesenta del siglo XX y que luego amplió Carl Sagan. Las civilizaciones del tipo I serían capaces de transmitir señales de potencia equivalente a toda la energía solar que recibe un planeta como la Tierra, o sea unos 10^{16} watt. Las civilizaciones del tipo II podrían manejar potencias de magnitud similar a la energía total que emite una estrella solar, en torno a los 10^{27} watt. Civilizaciones del tipo III, aún más poderosas, podrían gobernar la galaxia entera, del orden de 10^{38} watt. Si la capacidad de una civilización está comprendida entre tales valores, el tipo que le corresponde se halla interpolando logarítmicamente. Así pues, dada la potencia de salida de Arecibo, la humanidad se clasifica como civilización de tipo 0,7.

Para cualquier combinación de distancia y potencia del transmisor, el diagrama indica qué fracción de las estrellas se ha explorado sin éxito hasta el momento. Las zonas blancas y en color representan las civilizaciones cuya existencia podemos descartar con diversos grados de confianza. La zona negra corresponde a las civilizaciones que podrían haber escapado a nuestras pesquisas. Esta zona negra va creciendo según se avanza hacia la derecha, es decir, a medida que nos alejamos de la Tierra. Los programas SETI excluyen totalmente las transmisiones de radio al nivel de Arecibo hasta distancias máximas de 50 años luz, más o menos. A distancias más remotas sólo pueden descartarse los transmisores más potentes. SETI falla por completo mucho más allá de la Vía Láctea, porque los movimientos relativos de las galaxias desplazarían todas las señales fuera de la banda de detección.

Estas conclusiones no son irrelevantes. Antes de que se empezase a analizarlo se creía que las civilizaciones de los tipos II y III podrían ser bastante comunes. Pero no es éste el caso, conclusión que concuerda con otros datos astronómicos. A menos que las supuestas supercivilizaciones hubieran eludido milagrosamente la segunda ley de la termodinámica, necesitarían volcar al espacio el calor desechado, lo que quedaría patente en las longitudes de onda del infrarrojo. Pero las investigaciones de Jun Jugaku y sus colegas del Instituto de Investigación de la Civilización, en Japón, no han notado tal calor desperdiciado dentro de un radio de 80 años luz. Suponiendo que las civilizaciones estén esparcidas aleatoriamente, estos resultados imponen también límites a la separación media entre civilizaciones y por ende a su frecuencia de aparición en zonas no sondeadas de la galaxia.

Por otra parte, en la Vía Láctea pudiera haber millones de civilizaciones no detectadas que no fueran más que un poco más avanzadas que la nuestra. Al menos cien civilizaciones del tipo I podrían compartir con nosotros la galaxia. Para complicar aún más las cosas, los extraterrestres tal vez estuvieran utilizando frecuencias diferentes o transmitiendo esporádicamente. Los programas SETI han registrado sin duda

las naves se desplacen al 10 por ciento de la velocidad de la luz y que transcurra un período de 400 años entre la fundación de una colonia y el envío por ésta de otras nuevas colonias, el frente de la onda colonizadora avanzaría a una velocidad media de 0,02 años luz por año. Dado que la galaxia abarca 100.000 años luz, su colonización se habría completado en no más de cinco millones de años. Aunque muy largo en términos humanos, este ámbito temporal no representa más que el 0,05 por ciento de la edad de la galaxia. En comparación con otras escalas cronológicas utilizadas en astronomía y en biología, es prácticamente instantáneo. La mayor incertidumbre reside en el tiempo que pueda necesitar una colonia para establecerse y para reproducirse mediante nuevas colonizaciones. Un límite superior razonable podría ser de 5000 años, tiempo que ha tardado la civilización humana en desarrollarse desde los primeros núcleos urbanos hasta los vuelos espaciales. La colonización galáctica total necesitaría en tal caso unos cincuenta millones de años.

La consecuencia es clara: la primera civilización tecnificada que hubiese alcanzado la capacidad y albergado el deseo de colonizar la galaxia podría haberlo hecho antes de que ninguna otra competidora hubiera tenido la menor oportunidad de evolucionar. En principio esto podría haber sucedido hace miles de millones de años, cuando la Tierra estaba poblada únicamente por microorganismos y se encontraba abierta de par en par a los influjos externos. Pero no hay artefacto físico, rastro químico ni influencia biológica claros que indiquen que tal cosa haya ocurrido nunca. Aun si la Tierra hubiese sido objeto de una siembra deliberada de vida, como especulan algunos, desde entonces volvió a estar completamente sola.

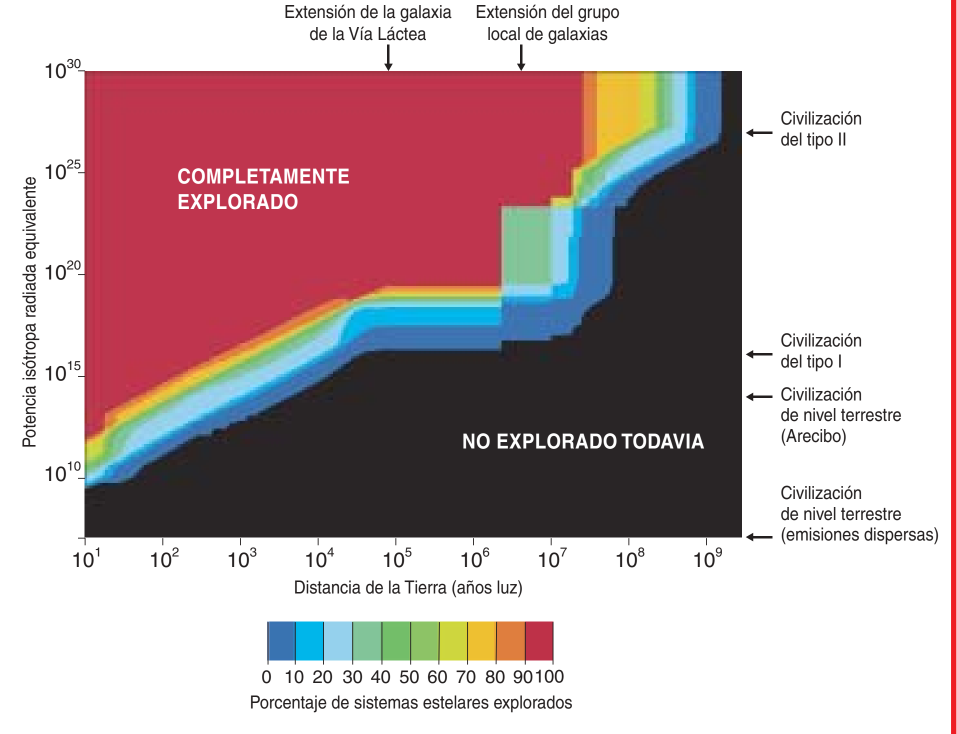
De aquí se infiere que toda tentativa de resolver la paradoja de Fermi ha de apoyarse en suposiciones sobre el comportamiento de otras civilizaciones. Puede que lo primero que hicieran fuera destruirse a sí mismos. También pudieran tener interés en colonizar la galaxia. Quizá sus estrictas normas éticas les prohibieran interferir sobre otras formas de vida primitivas. Muchos investigadores de SETI, y muchas otras personas convencidas de que las civilizaciones extraterrestres tienen que ser numerosas, tienden a rechazar las implicaciones de la paradoja de Fermi apelando sin reservas a una o a varias de estas consideraciones sociológicas.

Pero se enfrentan con un problema fundamental. Estos intentos de respuesta no son verosímiles más que si el número de civilizaciones extraterrestres fuese pequeño. Si la galaxia hubiera albergado millones o miles de millones de civilizaciones tecnificadas, parece muy improbable que se destruyeran todas entre sí, que se contentaran con una existencia sedentaria o que admitieran un conjunto común de normas éticas para el tratamiento de formas de vida menos desarrolladas. Y no se necesita más que una civilización técnicamente avanzada para acometer, por las razones que sea, un programa de colonización galáctica. Por supuesto que la única civilización de la que tenemos noticia —concretamente, la nuestra— todavía no se ha autodestruido, da señales evidentes de ser expansionista y no muestra especiales reparos en perturbar a otros seres vivientes.

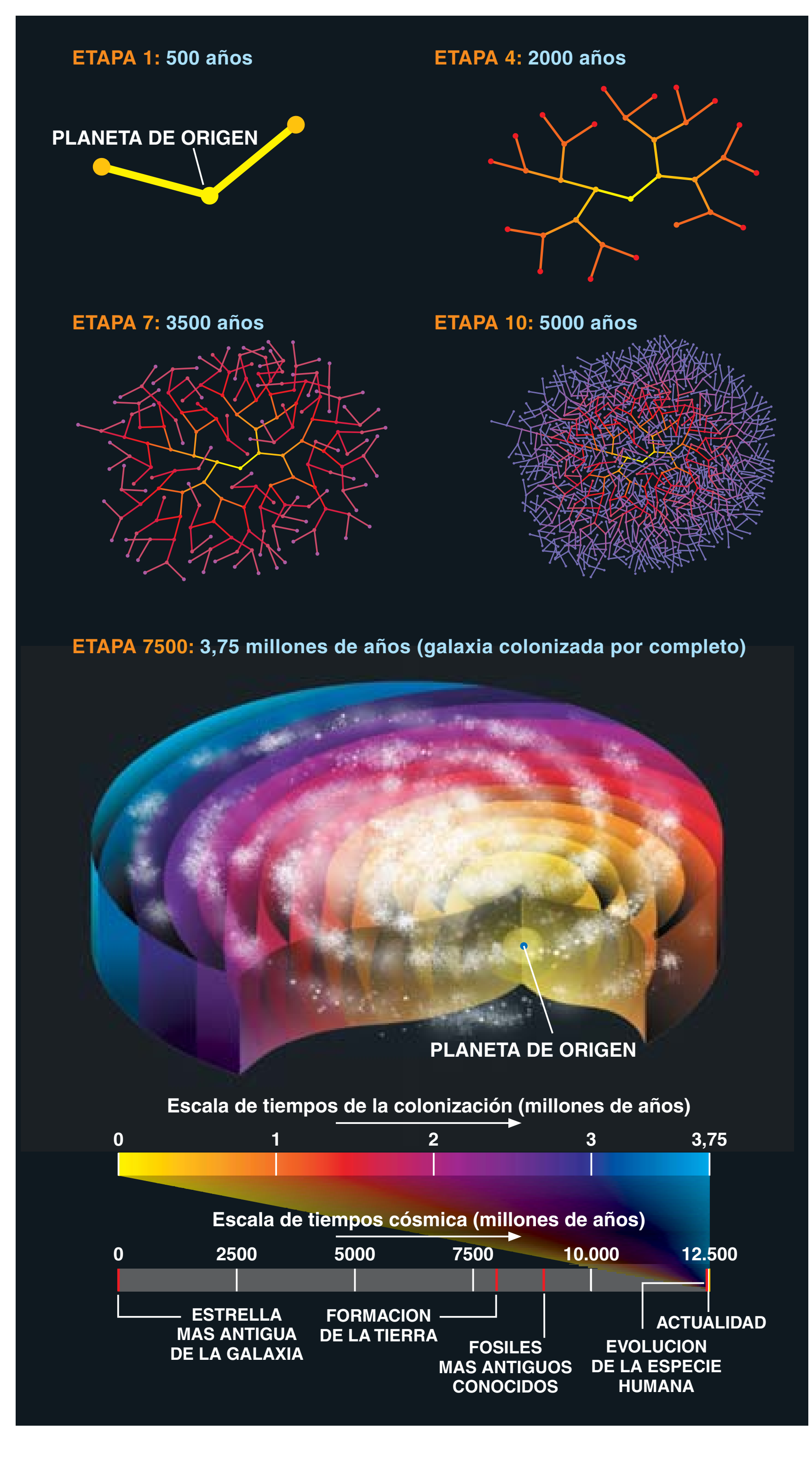
Pese a la inmensidad del empeño, creo que pueden señalarse varias razones por las que un programa de colonización interestelar tiene visos de verosimilitud. Una de ellas es que una especie propensa a colonizar ya gozaría de ventajas evolutivas en su propio planeta de origen, no siendo

numerosos "eventos extraestadísticos", señales demasiado intensas para ser ruido, pero que nunca han vuelto a observarse. Estas transmisiones pudieran ser ondas irregulares procedentes de teléfonos celulares próximos, pero también pudieran ser emisiones extraterrestres intermitentes. Nadie lo sabe todavía. Aunque los avances técnicos aumenten cada vez más la capacidad de SETI, no se ha explorado más que una diminuta fracción de las posibilidades existentes.

ANDREW J. LEPAGE es físico y trabaja en Visidyne, Inc., en Burlington, Massachusetts, donde analiza datos recogidos por sensores remotos situados en satélites. Ha escrito más de treinta artículos sobre SETI y exobiología.



LOS RESULTADOS DE LOS PROGRAMAS SETI se resumen en este diagrama. La zona negra muestra civilizaciones que pudieran haber escapado a nuestras pesquisas radioeléctricas, bien por demasiado lejanas o por no transmitir con intensidad suficiente. Para utilizar el diagrama, se toma una intensidad de transmisión como ordenada y, siguiendo el borde de la zona negra, se halla, como abscisa, la distancia de la Tierra que le corresponde. Por ejemplo, un transmisor de 10^{14} watt como el de Arecibo tiene que distar de nosotros más de 4000 años luz para poder escapar a la búsqueda. El código de colores ofrece información más detallada, a saber, el porcentaje estimado de todos los sistemas estelares que han sido examinados en busca de transmisores de potencia igual o superior a una determinada.



2. LA COLONIZACION de una galaxia no lleva tanto tiempo como pudiera pensarse. Los seres humanos iniciarían el proceso enviando colonos a dos estrellas próximas, viaje que podría durar unos cien años con las técnicas previsibles. Transcurridos cuatro siglos más para asentarse, cada colonia enviaría por su cuenta dos nuevas expediciones y así sucesivamente. Al cabo de 10.000 años nuestros descendientes podrían habitar todos los sistemas estelares situados a menos de 200 años luz de distancia. Colonizar la galaxia entera llevaría 3,75 millones de años, lo que, en términos cósmicos, es una fracción de segundo. Bastaría con que una sola civilización foránea hubiese acometido tal programa alguna vez para que sus colonias resultasen visibles por doquier.

difícil imaginar que esta herencia biológica se transfiriera a la cultura de la era espacial. La colonización podría emprenderse también por razones políticas, religiosas o científicas. Estas últimas parecen ser las más probables si se tiene en cuenta que la primera civilización sometida a evolución estaría, por definición, sola en la galaxia. Todas sus exploraciones SETI resultarían negativas y podría entonces iniciar un programa de exploración interestelar sistemática para hallar una respuesta.

¿Se resuelve la paradoja?

Por si fuera poco, pese a todo lo pacíficas, sedentarias o faltas de curiosidad que puedan ser la mayoría de las civilizaciones ET, en último término todas tendrían un motivo para la emigración interestelar porque ninguna estrella es eterna. Cientos de millones de estrellas como el Sol han consumido su hidrógeno combustible a lo largo de la historia de nuestra galaxia y han terminado sus días como gigantes rojas y como enanas blancas. Si abundaban las civilizaciones en tales estrellas, ¿a dónde habrían ido a parar? ¿Se conformaron con extinguirse?

La aparente rareza de las civilizaciones tecnificadas reclama una explicación, que podría hallarse en el enriquecimiento químico de la galaxia. Toda forma de vida terrestre y también cualquier proceso bioquímico extraterrestre imaginable dependen de elementos más pesados que el hidrógeno y que el helio, sobre todo del carbono, del nitrógeno y del oxígeno, los cuales, producto de reacciones nucleares en las estrellas, se han ido acumulando progresivamente en el medio interestelar en el que se forman las nuevas estrellas y planetas. Sus concentraciones fueron más reducidas en el pasado, puede que demasiado bajas para que surgiese la vida. El Sol cuenta, para su edad, con una relativa abundancia de tales elementos en comparación con otras estrellas de nuestra región galáctica. No cabe excluir que nuestro sistema solar fuese por casualidad el que arrancase en cabeza de la carrera del origen y la evolución de la vida.

Pero este argumento no es tan concluyente como pueda parecer a primera vista. Por una parte, no se conocen las proporciones críticas mínimas de los elementos pesados que requiera el desarrollo de la vida. Si bastara con una décima parte de las



3. LOS CADAVERES ESTELARES, como lo es esta nebulosa Mariposa, están esparcidos por nuestra galaxia. Si alrededor de esas estrellas hubo seres inteligentes, ¿dónde estarán ahora?

que se encuentran en el Sol, la vida pudiera haber surgido en torno de estrellas mucho más antiguas. Y aunque en el Sol abunden esos elementos, tampoco es único en reunir tales condiciones. Consideremos la cercana estrella 47 de la Osa Mayor, semejante al Sol, que cuenta también con un planeta de la masa de Júpiter, recientemente descubierto. Esta estrella contiene elementos en las mismas cantidades que el Sol, pero su edad estimada se eleva a siete mil millones de años. Cualquier tipo de vida que pudiera haber surgido en ese sistema planetario se hubiera anticipado a la nuestra en 2500 millones de años. Muchos millones de estrellas de antigüedad semejante y con abundancia de elementos químicos pueblan la galaxia, especialmente en su región central. Por ello es casi seguro que la evolución química de la galaxia no puede justificar por completo la paradoja de Fermi.

En mi opinión, la historia de la vida sobre la Tierra apunta hacia una explicación más convincente. Aquí han existido organismos vivos casi desde el principio, pero la vida multicelular animal no apareció hasta hace unos 700 millones de años. Durante más de tres mil millones de años la Tierra estuvo habitada solamente por microorganismos unicelulares. Tan gran lapso de tiempo pudiera significar que la evolución hacia un organismo más complicado que la célula simple sea muy poco probable, de modo que la transición a los animales multicelulares no se produjera más que en una minúscula fracción de los millones de planetas habitados por organismos unicelulares.

Puede replicarse que la prolongada soledad de la bacteria no fue más que un prólogo necesario para la aparición final de la vida animal sobre la Tierra. Quizá transcurrió tanto tiempo —y transcurriría en proporciones semejantes en otros planetas habitados— para que la fotosíntesis bacteriana pudiese producir las cantidades de oxígeno atmosférico necesarias para formas de vida más complejas. Pero aun en el caso de que finalmente aparezcan formas multicelulares en todos los planetas que sustentan vida, no por ello estas formas de vida han de conducir a criaturas inteligentes y todavía menos a civilizaciones tecnificadas. Como señala Stephen Jay Gould en su obra *Wonderful Life*, la evolución de la vida inteligente depende de una multitud de influencias ambientales esencialmente aleatorias.

Esta contingencia se refleja con suma claridad en el fatal destino de los dinosaurios. Estos seres dominaron el planeta durante 140 millones de años, pero no llegaron a crear una civilización tecnificada. Sin su extinción, resultado de un evento fortuito, la historia de la evolución habría sido muy diferente. La evolución de la vida inteligente sobre la Tierra se ha asentado sobre un gran número de sucesos fortuitos, algunos de ellos con muy escasas probabilidades de ocurrencia. El físico Brandon Carter llegó en 1983 a la conclusión de que "las civilizaciones comparables a la nuestra probablemente resulten extremadamente raras, aun cuando sean corrientes en la galaxia ubicaciones tan favorables como lo es la de nuestro planeta".

Por descontado, aunque todas estas razones a mí me parezcan persuasivas, pueden no dar en el blanco. William Whewell, destacado protagonista del debate sobre la vida extraterrestre, observaba en 1853: "Las discusiones que sostenemos pertenecen a las regiones más fronterizas de la ciencia, donde el conocimiento acaba y comienza la ignorancia." Pese a todo lo que se ha avanzado desde los días de Whewell, seguimos prácticamente en la misma posición. Y el único camino para achicar nuestra ignorancia es una exploración más minuciosa del entorno cósmico.

Esto significa que debe continuarse el programa SETI hasta que se detecte alguna señal o hasta que puedan fijarse límites estrictos al número de civilizaciones radiotransmisoras que pudieran haber escapado a nuestra atención, lo que creo más hacedero. Se debería proseguir un riguroso programa de exploración marciana con miras a determinar si alguna vez hubo signos de vida en ese planeta. Si la respuesta fuera negativa, habría que averiguar el porqué. Ha de fomentarse el desarrollo de grandes instrumentos ubicados en el espacio, capaces de detectar planetas del tamaño del nuestro en torno de estrellas cercanas y de buscar signos de vida en sus atmósferas por medios espectroscópicos. Y, por último, hay que desarrollar técnicas dirigidas al lanzamiento al espacio interestelar de sondas que estudien esos planetas.

Acometer un programa de exploración tan ambicioso es la única vía para conseguir una comprensión más plena del lugar del hombre en el cosmos. Si no se encuentran pruebas de otras civilizaciones de técnica avanzada, quizá sea la humanidad quien esté llamada a embarcarse en la exploración y en la colonización galácticas.

IAN CRAWFORD es astrónomo del departamento de física y astronomía del University College de Londres. Sus investigaciones se centran principalmente en el estudio de los entornos interestelar y circunestelar, incluyendo los discos que supuestamente son planetas en formación. Cree que la perspectiva cósmica que ofrecen los programas de exploración del universo refuerza la idea de la unificación política del mundo. "Las imágenes de la Tierra vista desde el espacio subrayan la insignificancia cósmica de nuestro planeta entero, sean cuales fueren las fronteras nacionales que hayamos trazado sobre su superficie... Si algún día se encontrase otra especie inteligente en las estrellas, ¿no convendría que la humanidad hablara con una voz única?"

Comunicación intragaláctica

La inmensidad y los azares del espacio obligarán a adoptar medidas extremas para las comunicaciones interestelares

George W. Swenson, Jr.

Hay quienes sospechan la existencia de miles de civilizaciones avanzadas entre los cien mil millones de estrellas que, como mínimo, pueblan nuestra galaxia, una posibilidad que han venido a reforzar los datos recientes de que los sistemas planetarios son más abundantes de lo que se creía en la Vía Láctea. Durante cuarenta años se han explorado esporádicamente los cielos en busca de cualquier señal de radio emitida por alguna civilización avanzada de la inmensidad galáctica. Esta búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) es un seguimiento pasivo. Mediante antenas parabólicas y receptores de radio muy sensibles se intenta detectar señales que, si de veras existen, probablemente sean demasiado débiles al llegar a nosotros.

Todos los grandes programas SETI de la Tierra se han basado fundamentalmente en tentativas de recibir señales que se habrían transmitido con una anterioridad de decenios, de siglos y hasta de milenios. Esta es la razón de que se haya publicado muy poco sobre el problema complementario que plantea SETI, que podría formularse así: ¿qué se necesitaría para construir un sistema radiotransmisor que tuviera siquiera la más mínima probabilidad de ser detectado por un receptor situado a decenas o a cientos de años luz de distancia?

El ejercicio no es una mera abstracción. Quienes trabajan en SETI saben desde hace tiempo que sería imposible montar todo un sistema creíble de exploración y de recepción sin tener alguna idea sobre los sistemas y los métodos de transmisión que verosímilmente pudieran emplearse al otro extremo. Quizá lo más importante sea que al desmenuzar las dificultades de dirigir un haz radioeléctrico a distancias tan enormes aparece una de las preocupaciones fundamentales de SETI, consistente en que, según la física más elemental, será sumamente difícil que una civilización cualquiera anuncie su presencia a otra civilización de un sistema solar indeterminado, entre la gran profusión de estrellas de una galaxia.

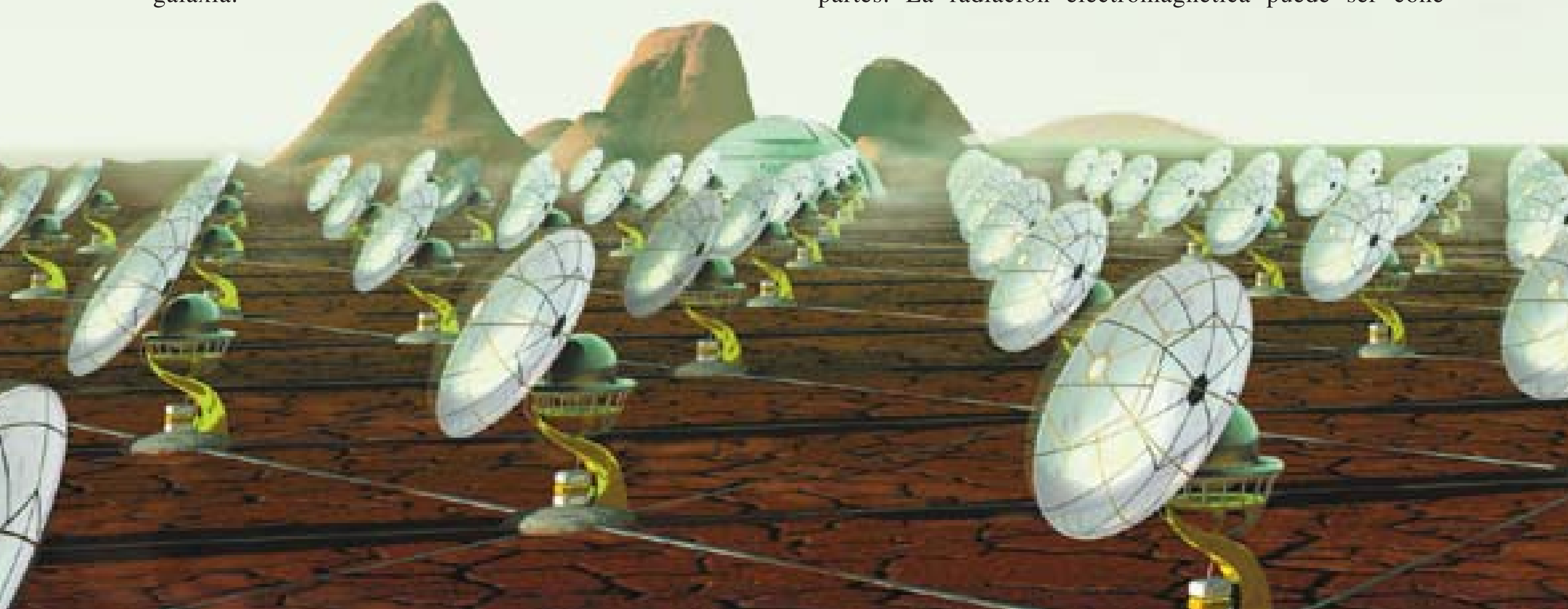
Este análisis —unido a las teorías de que las civilizaciones avanzadas pudieran ser mucho más raras de lo que creen algunos— podría arrojar luz sobre la paradoja central de SETI. Si existen miles de civilizaciones adelantadas en nuestra propia Vía Láctea, ¿por qué no hemos sabido nada de ellas?

El primer paso importante en el proyecto de un transmisor capaz de enviar señales intergalácticas consiste en elegir la parte del espectro electromagnético que vaya a utilizarse. Para movernos dentro de límites abarcables, elegiremos las ondas radioeléctricas, que se propagan bastante bien por el espacio en comparación con otras formas de radiación electromagnética, como la luz, sujetas entre otros factores a la dispersión y a la absorción debidas al polvo interestelar.

Dentro del espectro radioeléctrico los especialistas de SETI han escogido las frecuencias comprendidas entre 1 y 3 gigahertz como las más probables para la comunicación interestelar. Se cuenta con técnicas muy avanzadas en esta parte del espectro y, si se exceptúan las emisiones del hidrógeno neutro en la vecindad de 1,42 gigahertz, la absorción y el oscurecimiento de las ondas por moléculas y por nubes de polvo interestelares es mínima a estas frecuencias, como lo es la radiación de fondo procedente de la Vía Láctea.

Las emisiones radioeléctricas se propagan por el espacio bajo la forma de campos eléctricos y magnéticos que varían periódicamente y que avanzan unidos a la velocidad de la luz, 300.000 kilómetros por segundo. La distancia a que puede detectarse una onda de radio (suponiendo la correcta concepción de las antenas de transmisión y de recepción) depende de estos factores principales: el entorno de ruido electromagnético del receptor, la sensibilidad del receptor, la potencia de la señal transmitida y el tamaño de las antenas transmisora y receptora.

Empecemos por el ruido. Literalmente está en todas partes. La radiación electromagnética puede ser cohe-





rente, es decir, estructurada regularmente como las emisiones de un transmisor de radio. Pero también existe la radiación incoherente, que consiste en impulsos erráticos, como el zumbido que oímos en un receptor de radio cuando no está sintonizada estación alguna. Esta radiación incoherente es lo que llamamos ruido.

Todo cuerpo material situado a una temperatura superior al cero absoluto emite radiación electromagnética —ruido— en todo el espectro, la cual alcanza su máxima intensidad a una frecuencia determinada por su temperatura absoluta. Los físicos suelen caracterizar por conveniencia el ruido mediante la temperatura de un "cuerpo negro" imaginario, que representaría las fuentes del ruido de un sistema de comunicaciones, por ejemplo.

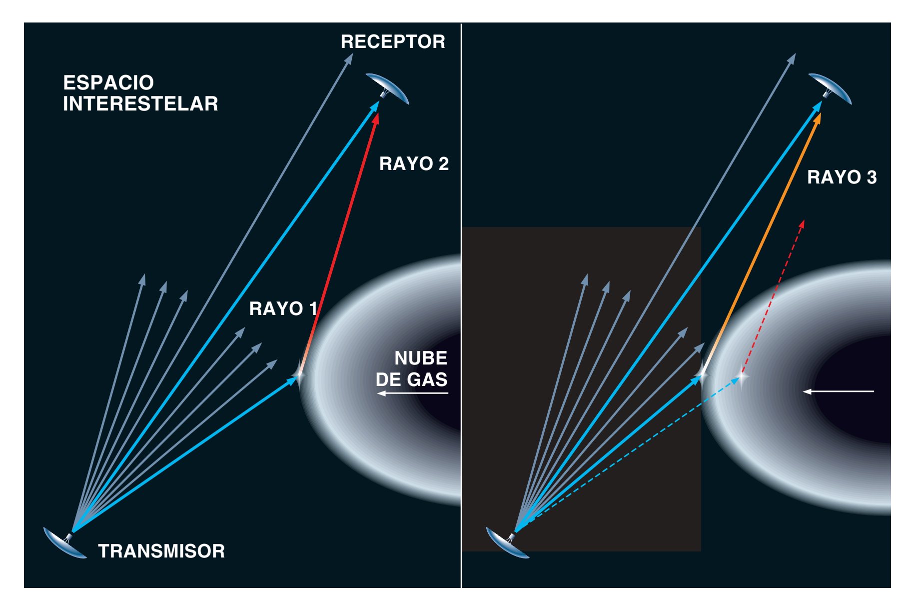
Este ruido de sistema limita fundamentalmente nuestra capacidad para comunicar. Para que una señal pueda recibirse, tiene que llegar a la antena receptora con una potencia al menos ligeramente superior al ruido de esa antena. Esto podría compararse a dos personas que intentasen conversar en medio de una fiesta bulliciosa: tendrían que elevar el nivel de sus voces hasta que pudieran superar el ruido circundante.

El ruido de la cadena amplificadora que constituye un receptor de radio procede de dos fuentes. Una es externa, el ruido de la antena, y otra es interna, el ruido generado dentro de los propios amplificadores. La técnica de la amplificación ha avanzado hasta el punto de que es posible construir receptores cuyo ruido interno sea de unos pocos kelvin nada más.

El ruido procedente del exterior suele escapar al dominio del operador, por lo que es el factor predominante en el comportamiento de un sistema receptor de gran calidad, como los utilizados en astronomía. Las fuentes de ruido externo incluyen el suelo (para antenas construidas sobre un planeta), la atmósfera planetaria, el fondo galáctico, las fuentes astronómicas de radioemisiones intra y extragalácticas y la radiación cósmica de fondo, resto de la gran explosión inicial de nuestro universo. En uno de los mejores receptores terrestres actuales, o en otro algo más avanzado, todas estas fuentes, incluyendo el ruido interno generado en el propio receptor, ascenderían a unos 15 kelvin, si se hubiese blindado el conjunto para reducir al mínimo la radiación del suelo.

¿Qué potencia debemos entregar a la antena receptora distante para superar esa temperatura de ruido? Para calcular su valor hay que advertir primero que la potencia de ruido del receptor depende de la gama de frecuencias que cubra (llamada anchura de banda). Como el ruido está distribuido a través del espectro, cuanto menor sea la anchura de banda del receptor menor potencia de ruido admitirá. La

1. UN OPERADOR DE RADIO EXTRATERRESTRE (*arriba*) podría controlar una red de antenas parabólicas con una gran superficie equivalente.



2. LOS EFECTOS MULTITRAYECTO aparecen cuando una nube de gas interestelar refracta o desvía un rayo (*rojo* y *naranja*) de manera que coincida en el receptor con otro rayo (*azul*) procedente del mismo transmisor. Al moverse la nube, varía la diferencia entre las longitudes de las trayectorias de los rayos directo y refractado. Los rayos recibidos pasarían, pues, por variaciones cíclicas entre refuerzo y anulación, haciendo que la señal recibida (que es la suma de los rayos) centellease.

anchura de banda habrá de restringirse al mínimo capaz de contener la señal esperada, si se quieren detectar las señales más débiles posibles.

El aumento de la anchura de banda permitirá en cambio transmitir datos a mayor velocidad. Por ejemplo, una conversación normal requiere en torno a 2,5 kilohertz de anchura de banda, mientras que una señal de televisión estándar ocupa unos 4,5 megahertz. Si se fija la velocidad de información en cinco bit por segundo, la anchura de banda requerida rondará los 2,5 hertz, dependiendo de las proporciones de señal y de ruido presentes. Tal anchura de banda permitiría enviar el mensaje "hola" en cuatro segundos, suponiendo que se necesitasen cinco bit para representar cada carácter.

Una vez determinadas la anchura de banda y la temperatura de ruido puede abordarse la pregunta previa: ¿cuánta potencia de señal se necesita en la antena receptora para superar la potencia de ruido? Para calcular la potencia de ruido (P_n) se aplica la fórmula $P_n = kTB$, donde k es la constante de Boltzmann, $1{,}3806 \times 10^{-23}$ joule por kelvin; T la temperatura de ruido, 15 kelvin, y B la anchura de banda del sistema detector, 2,5 hertz. De aquí resulta que la potencia de ruido del sistema es de $5{,}2 \times 10^{-22}$ watt, y el receptor necesitará recibir del transmisor distante una potencia de señal igual o muy próxima a ese valor para detectarla en presencia de ese nivel de ruido. Supondremos para este caso que la superficie equivalente de la antena receptora sea de un metro cuadrado. La intensidad de señal requerida en la antena receptora será entonces de $5{,}2 \times 10^{-22}$ watt por metro cuadrado.

La potencia que ha de tener un transmisor distante para entregar esta intensidad a la antena receptora depende de lo alejados que se encuentren ambos sistemas. También dependerá de que la transmisión se realice en todas las direcciones a la vez ("omnidireccional") o de que esté concentrada en un cono estrecho. Supongamos arbitrariamente una distancia de 100 años luz, que equivalen a $9{,}46 \times 10^{17}$ metros, así como que la señal se emite omnidireccionalmente, puesto que no se sabe dónde pueda estar el hipotético interlocutor.

Aplicando la relación cuadrática inversa, puede calcularse la potencia que necesita un transmisor de radiación omnidireccional a esa distancia, que es: $(5{,}2 \times 10^{-22}) \times 4\pi \times (9{,}46 \times 10^{17})^2 = 5{,}8 \times 10^{15}$ watt. Por supuesto que esta enorme potencia supera todos los límites; representa más de 7000 veces la capacidad generadora de electricidad de los Estados Unidos.

Pero resulta que 100 años luz no son más que un paso dentro de la galaxia. A tales distancias de la Tierra hay unas mil estrellas, lo que es menos de la millonésima parte del uno por ciento de las estrellas galácticas. Para que hubiera una probabilidad razonable de entrar en relación con alguna civilización avanzada habrían de alcanzarse las estrellas comprendidas en un volumen mucho mayor.

Como alternativa a la transmisión y a la recepción omnidireccionales pueden parecer atractivas las señales dirigidas. Examinemos concretamente el compromiso entre el tamaño de la antena receptora y la potencia de señal requerida del transmisor. Una antena cuya superficie equivalente sea muy grande en comparación con el cuadrado de la longitud de onda que recibe se considera como de haz de recepción estrecho. Cuando una antena de este tipo se orienta hacia un transmisor, obtiene una "ganancia" grande en la cantidad de potencia que se extrae de la onda radioeléctrica, por lo que se necesita transmitir menos potencia para llegar al receptor. La desventaja —el tener que apuntar el haz de recepción en una dirección concreta— es, en nuestro caso, importante, por cuanto suponemos que el supuesto interlocutor no sabe dónde nos encontramos.

No obstante, examinemos las cifras. En nuestro ejemplo anterior habíamos supuesto que la antena receptora tenía una superficie equivalente de un metro cuadrado solamente. La unidad podría ser una antena de bocina o un reflector parabólico con diámetro aproximado de 1,5 metros. Esta antena, que funciona en longitud de onda de 20 centímetros, tiene un haz de recepción de unos 11 grados; cuando el haz apunte hacia el transmisor se recibirá bien cualquier señal situada dentro de él.

El empleo de antenas todavía mayores reduciría aún más las necesidades de potencia del transmisor, pero también a costa de progresivos estrechamientos del haz. Referida a una hipotética antena omnidireccional, la ganancia representada por una señal dirigida es proporcional a la superficie equivalente de la antena expresada en cuadrados de longitud de onda. Tomemos como ejemplo una red de antenas contiguas de un kilómetro de lado. A una longitud de onda de 20 centímetros esta red tendría una ganancia un millón de ve-

GEORGE W. SWENSON, JR., es profesor emérito de ingeniería eléctrica y astronomía en la Universidad de Illinois. Fue miembro del proyecto Cíclope, estudio inicial de SETI realizado en 1971.

ces mayor que la antena de un metro cuadrado, pero desgraciadamente la abertura de su haz no sería más que de 11 milésimas de grado. La potencia requerida en el transmisor se reduciría a la millonésima parte, pero el haz estrecho exigiría una precisión asombrosa en la puntería y el seguimiento.

Si se utilizase una red cuadrada de antenas para transmitir la señal, se obtendría una mejora en la ganancia y una reducción de abertura del haz similares a las obtenidas en el caso de la recepción. Supongamos ahora que en ambos extremos del canal de comunicación se sitúan redes de antena cuadradas de un kilómetro de lado. La potencia de transmisión requerida sería entonces de 5700 watt solamente, pero resultaría completamente inverosímil que los estrechísimos haces de ambas antenas se alineasen entre sí por casualidad.

Se plantea así un compromiso clásico. Si se utilizan antenas de superficie mínima, la potencia de transmisión requerida sobrepasará la capacidad generadora mundial, mientras que unas antenas gigantescas exigen potencias moderadas, pero sus haces de transmisión y recepción son tan estrechos que es casi imposible que los futuros interlocutores lleguen a encontrarse en los insondables abismos del espacio galáctico.

Existen desde luego situaciones de compromiso entre los ejemplos extremos que se han expuesto. Por desgracia ninguna de ellas garantiza que pueda superarse el problema básico de la comunicación interestelar, pues las enormes distancias obligan a tomar medidas excepcionales.

Pero no hay que perder la esperanza. Los parámetros elegidos anteriormente para el sistema comunicativo eran razonables, aunque en cierto modo arbitrarios. Podría partirse, por ejemplo, de otros supuestos acerca del grado de avance técnico del interlocutor remoto, lo que permitiría adoptar una relación señal/ruido más baja o una banda más estrecha, reduciendo consecuentemente las necesidades de potencia.

Más importante aún es que pueda concebirse una antena receptora muy grande, formada por una red de antenas y de receptores individuales, para producir numerosos haces de recepción simultáneos en direcciones diferentes, con lo que se agilizaría la búsqueda de transmisores desconocidos. También podrían utilizarse al mismo tiempo muchos canales receptores de frecuencias, técnica que se emplea en los programas SETI actuales. Las ventajas de esta multiplexación no pueden, sin embargo, aplicarse a la transmisión sin reducir la potencia disponible para cada haz o canal de frecuencia, dado que la potencia total es fija.

Hasta ahora no hemos analizado más que los aspectos más elementales del proyecto, referentes a los dos extremos, transmisor y receptor, de un sistema de comunicación interestelar. El gran espacio interpuesto presenta también dificultades, como los llamados efectos de propagación multitrayecto. Para comprenderlos se necesita conocer algo sobre el modo de propagarse que tienen las ondas radioeléctricas. Las ondas avanzan en línea recta en el vacío, hasta que encuentren un obstáculo material que las absorba, las refleje o las refracte. Pero lo cierto es que en el espacio interestelar hay reducidas concentraciones de gases y de partículas materiales, así como campos magnéticos casi estáticos. Estos factores pueden desviar las ondas de radio de su trayectoria directa durante las enormes distancias que se recorren, así como cambiar su polarización y producir fluctuaciones esporádicas de la intensidad de la señal recibida. Estos fenómenos desaconsejan el empleo de haces muy estrechos para la transmisión y la recepción, aumentando en consecuencia las necesidades de potencia transmitida.

Se produce refracción cuando las ondas penetran en un gas, en el cual se propagan a diferente velocidad que en el espacio libre. La refracción modifica la dirección de las ondas y puede ser causa de que dos ondas originadas en la misma fuente se sumen, produciendo una onda más compleja. Al entrar una onda en un gas puede ocurrir, por ejemplo, que una parte de ella se propague más despacio que otra, dependiendo de la distribución del gas, variación de velocidad que podría provocar desfases entre los componentes de la onda resultante. Según sean la magnitud del desfase y la diferencia de longitud de trayecto entre los componentes de la onda, las porciones desfasadas podrían reforzarse entre sí, anularse una a otra o encontrarse en cualquier situación intermedia.

Supongamos ahora que el gas interpuesto en el trayecto de la segunda onda se desplazase con respecto a la trayectoria de ésta, de tal manera que el desfase dependa del tiempo (*véase la figura 2*). La combinación de los dos componentes de la onda variará entonces con el tiempo, reforzándose o anulándose a intervalos. Pudieran producirse efectos parecidos en numerosas situaciones en las que intervienen objetos reflectantes, desplazamientos Doppler y trayectos múltiples de las ondas. Estos ejemplos de propagación multitrayecto pudieran hacer que la señal constante emitida por un transmisor se convirtiese en otra muy modulada cuando la detectase un receptor muy lejano.

Todas estas consideraciones indican que el uso de ondas radioeléctricas para establecer contactos interestelares es bastante desalentador. Las inmensas distancias galácticas requieren forzosamente recurrir a medidas del todo irreales: potencias de transmisión enormes, antenas descomunales y haces de estrechez impracticable. No hay duda de que un proyecto verosímil que dirigiese señales hacia un gran surtido de estrellas exigiría unos sistemas que probablemente sobrepasen las disponibilidades de una sociedad como la humana. Por si fuera poco, incluso aunque pudiera establecerse contacto de algún modo, el retraso en recibir respuesta a un mensaje podría muy bien abarcar muchos siglos. Aunque se superasen las formidables limitaciones físicas, este proyecto habría de estar claramente en manos de una larga sucesión de generaciones. Con toda probabilidad exigiría una organización social duradera basada en principios inmutables, como si se tratara de alguna de las religiones importantes de este mundo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ALIENS: CAN WE MAKE CONTACT WITH EXTRATERRESTRIAL INTELLIGENCE? Andrew J. H. Clark y David H. Clark. Fromm International, 1999.

RARE EARTH: WHY COMPLEX LIFE IS UNCOMMON IN THE UNIVERSE. Peter Douglas Ward y Donald Brownlee. Copernicus Books, 2000.

Puede conseguirse una lista extensa de los programas SETI en www.skypub.com/news/special/seti_toc.html

Instrumentos musicales de vidrio

Cuando se hace vibrar una lámina de vidrio se obtiene un timbre específico, "cristalino", que ha interesado a muchos compositores. La poca potencia y la fragilidad de los instrumentos así construidos les han privado de un puesto en las orquestas

Jean-Claude Chapuis

El sonido etéreo del vidrio fascina a los melómanos desde hace siglos y ha sido la causa de que se inventaran instrumentos de vidrio muy variados. El más sencillo es la campana de vidrio, que suena por percusión. Más complejo es el eufonio, que emite sonidos cuando se frota con el dedo una varilla de vidrio horizontal, excitando vibraciones en otra metálica vertical, conectada a la primera. Puede que el instrumento más conocido de la gran familia de los instrumentos de vidrio sea la armónica de cristal. Está formada por un eje horizontal que sirve de soporte a una serie de campanas de diferentes tamaños, embutidas unas dentro de otras. El intérprete hace girar el conjunto mientras sus dedos mojados, situados sobre los bordes de las campanas, las hacen vibrar por frotamiento, como cuando se hace vibrar un vaso pasando el dedo por su borde al final de una comida familiar un poco aburrida.

Se ha creído que el sonido del vidrio tuviera virtudes psicológicas. El compositor y constructor alemán Karl Leopold Röllig, que tocaba la armónica de vidrio y compuso obras para ella, atribuía a sus sonidos la facultad de crear lazos de amistad: "Se abalanzó sobre mí llorando y pidiéndome que parara; se abrazaron llenos de amistad y de pasión." Hasta el punto de que llega a mostrar inquietud por estas consecuencias: "No quiero imaginarme lo que pudiera suceder si una armónica cayera en manos de una persona supersticiosa o en las de un charlatán."

Los "músicos de vidrio" confiaban animar a sus oyentes: "Me sentiría feliz si pudiera incrementar un poco sus goces secretos y celestes", escribía el músico alemán Johann Christian Müller en 1780.



1. BENJAMIN FRANKLIN tocando su "armónica" de vidrio.

¿Por qué tiene el vidrio este timbre tan especial? ¿Y cómo se produce? Cuando Ann Ford publicó en Londres en 1761 un método para juegos de vasos musicales, junto con composiciones para ellos, declaraba: "La única música cuyos efectos oímos sin conocer la causa." Trataremos de comprender la acústica de los instrumentos de vidrio sin menoscabo de la poesía. El análisis nos indicará la forma en que pueden modificarse los instrumentos clásicos y crearse otros nuevos.

Campanas y vidrios percutidos

Se conocen obras musicales sacras y profanas que utilizan campanas de vidrio por lo menos desde el siglo XIII en China y desde el siglo XV en Europa. Ciertos juegos de campanas estuvieron organizados incluso en forma de carillones, con teclados que gobernaban unos mazos percutores. Estos instrumentos se fabricaban en Bohemia, que sería uno de los principales centros productores de vidrio artístico hasta finales del siglo XVIII.

Cuando los vidrieros ingleses inventaron el cristal, añadiendo óxido de plomo al óxido de silicio purificado, la transparencia del nuevo material aumentó, ya que el óxido de hierro que suele contener la arena in-

JEAN-CLAUDE CHAPUIS es intérprete, compositor y constructor de instrumentos. Ha creado el conjunto TransparenceS, que utiliza los instrumentos descritos junto con otros más conocidos.

troducía coloraciones pardas y verdosas. El vidrio de Bohemia dejó de ser el predominante en vidriería general, pero se le siguió utilizando para la construcción de instrumentos musicales, pues tenía "sonoridad", emitiendo un timbre menos rico, pero más potente que el del cristal.

Durante mucho tiempo se utilizó la percusión como único método de interpretación. Cuando se percute una pieza, parte de ella se desplaza de su posición de equilibrio. Si la deformación se mantiene dentro de los límites de la elasticidad de la sustancia, el cuerpo vuelve a adoptar su forma de equilibrio, en algunos casos tras haber oscilado a una frecuencia determinada por la forma y por las propiedades mecánicas del material. Un cuerpo que vibra comprime periódicamente el aire circundante y la propagación de esas perturbaciones corresponde a la emisión de sonidos con la frecuencia de vibración del cuerpo.

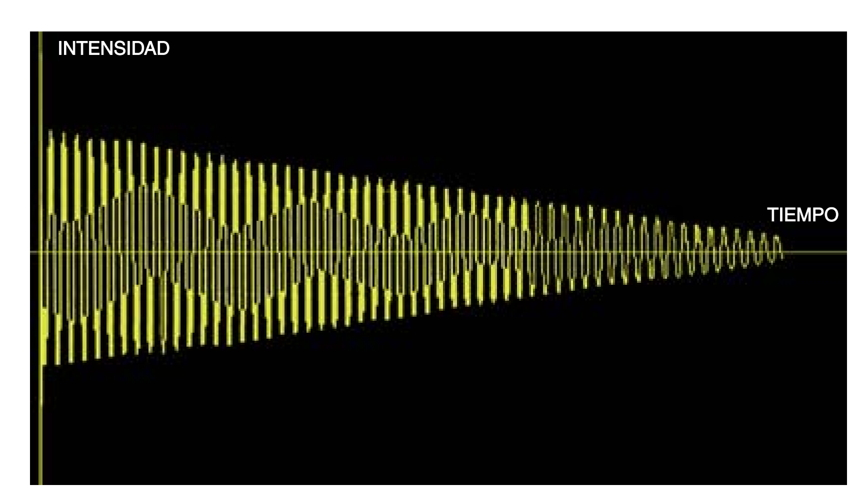
Es así como un golpe contra las paredes de una campana de vidrio la deforma en su totalidad, empezando a vibrar de acuerdo con varios modos de flexión. Cuando su apertura es circular, el modo de deformación más sencillo es una transformación del círculo en elipse, que a su vez se comprime formando una elipse perpendicular a la primera y así sucesivamente. Estos principios son bien conocidos por los fundidores de las campanas metálicas utilizadas en las iglesias. Para favorecer ciertos modos de deformación, es decir, ciertas frecuencias, ajustan el espesor de las paredes (y por lo tanto, la rigidez) en diferentes zonas de la campana, especialmente en la cúspide y en la base. Las frecuencias resultantes son las que dan personalidad a la campana.

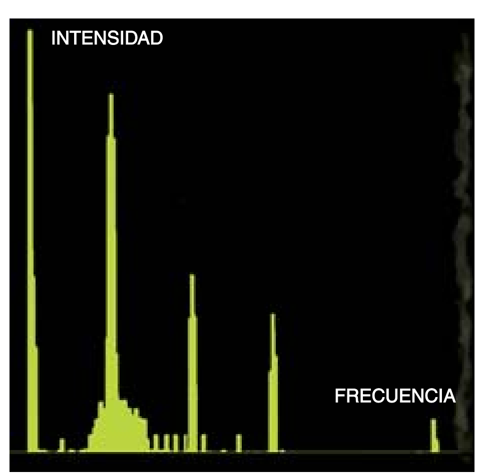
La energía acústica de las ondas emitidas es proporcional al cuadrado de la amplitud de la vibración, a la masa volumétrica del material vibrante y al cuadrado de la frecuencia. Esta es la razón de que los vidrios suenen poco. Como el estado vítreo es análogo al estado líquido (el vidrio es un "líquido que no fluye"), los vidrios tienen bajas densidades (cercanas a 2,2), siendo limitada también la amplitud de sus vibraciones. Sin sistemas de resonancia, como los utilizados en el balafón, los instrumentos de vidrio no pueden tocar *forte*.

En cambio su timbre les da personalidad. Este timbre viene determinado por el tipo de vibraciones que mueven el aire. Si la señal sonora fuera perfectamente sinusoidal, se emitiría una sola frecuencia. Los cuerpos sólidos rara vez vibran con una sola frecuencia, sino que tienen modos de deformación complejos. Esta deformación puede descomponerse en una suma de ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia de base, denominada fundamental, como se sabe gracias a los trabajos del matemático francés Joseph Fourier (1768-1830). Las on-



2. ALGUNOS INSTRUMENTOS DE VIDRIO. Los hay que suenan por percusión, como las campanas (*1* y *2*), los platos (*3*), el gamelán (*4*), el tímpano (*5*), el balafón (*6*) y el vibráfono (*7*). El serafín (*8*) y la armónica de vidrio (*9*) son frotados. En el caso del eufonio (*10*) el frotamiento de una varilla de vidrio excita la vibración de otras metálicas.





3. EL SONIDO DE UN INSTRUMENTO como la armónica de vidrio es una señal casi periódica (*a la izquierda*), donde pueden observarse fácilmente las frecuencias graves. Se analizan los timbres de los instrumentos examinando su espectro, es decir, la amplitud del sonido a diferentes frecuencias (*a la derecha*). El aquí reproducido es el espectro de una nota de armónica, en el que abundan los primeros armónicos.

das de frecuencia superior se denominan armónicos.

Esta descomposición no puede aplicarse más que a las ondas de tipo periódico. En el caso de los sonidos que evolucionan con el tiempo —por ejemplo en el caso de los instrumentos de percusión— ciertas frecuencias no son múltiplos exactos de la fundamental, denominándoselas "parciales" no armónicos.

La intensidad de las diversas frecuencias que componen el sonido total determina el timbre del instrumento, su "colorido sonoro". Este timbre se estudia mediante aparatos que registran el espectro sonoro, en forma de sonogramas. Así se observa que el sonido no tiene una composición espectral constante. Los "elementos transitorios" emitidos por el instrumento al inicio de la excitación caracterizan su "ataque".

El tener en cuenta estos elementos transitorios es esencial en el caso de los instrumentos de vidrio percutidos, ya que se asocian a fenómenos perceptibles. Por ejemplo, cuando se toca una varilla de vidrio, el golpe origina vibraciones perpendiculares a la longitud, como le sucede a la cuerda de un violín, junto con otras perpendiculares a la anchura. Puesto que el sonido de una cuerda corta es más agudo que el de otra larga, las ondas sonoras producidas por las ondas perpendiculares a la anchura de la varilla se amortiguan rápidamente, pero sus frecuencias son superiores. Así se percibe un chirrido inicial antes de percibir la vibración armoniosa de la varilla, correspondiente a las vibraciones perpendiculares a su longitud.

El timbre de los instrumentos de vidrio está también caracterizado por la extinción del sonido. La nota fundamental aparece de inmediato (claridad y dulzura) y perdura, extinguiéndose luego lenta y uniformemente, produciendo una impresión de irrealidad y de misterio. La sensación de "elevación" se debe sin duda al gran número de frecuencias emitidas, que abarcan un amplio espectro hasta los agudos. Estas frecuencias tienen intensidades que disminuyen de forma regular. La observación de los sonogramas confirma la sensación de equilibrio percibida.



4. CLAVE DE VIDRIO del Conservatorio Nacional de Artes y Oficios de París.

A veces los sonogramas reflejan algún defecto. La mala fusión de la mezcla inicial o una deformación que se produzca durante el soplado crearán parciales no armónicos. La emisión de estos últimos es habitual en el caso de las placas percutidas y hay casos en los que los constructores incluso los promueven para enriquecer el espectro. El riesgo es que, si no los recubre la serie armónica, se produzcan batidos que molesten la audición.

Debido a la fragilidad de las campanas de vidrio percutidas, se introdujeron modificaciones que paliaran los problemas de los ejecutantes. El acta notarial sucesoria de los bienes de un príncipe de Austria señala la existencia de un juego de campanas de percusión por mazos que se movían mediante un teclado, una especie de celesta de campanas.

La evolución hacia la armónica

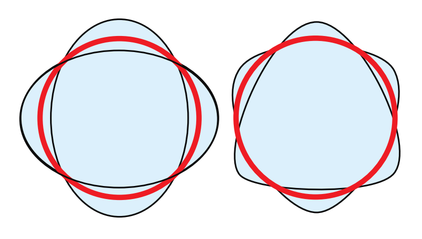
Luego aparecieron el cristalófono, que es un vibráfono con láminas de vidrio, y el glacecordo, un piano con "cuerdas de vidrio" ("cuerdas" que en realidad eran láminas o varillas), inventado por el francés M. Beyer hacia 1780. El teclado del glacecordo acciona unos mazos que golpean láminas de vidrio. La emperatriz Josefina tenía uno en su salón de música. Hector Berlioz, que lo denominaba "armónica de teclado", escribió para él su primera versión de *La Tempestad*. Camille Saint-Saëns le dio un papel muy especial en *El Acuario*.

El espectro sonoro de estos dos instrumentos es complejo, ya que la lámina oscila en sus tres dimensiones (pues también se produce torsión). Se la golpea por encima, en el caso del vibráfono, y por debajo en el del glacecordo. La masa volumétrica y la elasticidad del vidrio definen las propiedades mecánicas y por lo tanto acústicas; se afinan los instrumentos ajustando la longitud, el espesor o el diámetro de las láminas y varillas.

Desde el siglo XVI se exploró otra vía: la resonancia de los vidrios por frotamiento. Cuando Galileo cita la vibración de los vasos de agua al ser frotados lo hace en el contexto de una experiencia física y no como asunto musical. El jesuita Athanasius Kircher (que se interesó por los imanes, los eclipses, la linterna mágica que parece inventó, los volcanes...) evocó los vasos musicales en una de sus obras en 1673. El irlandés Richard Puckridge dispuso un juego de vasos con fines musicales en 1747; los afinaba llenándolos más o menos e interpretaba obras frotando sus bordes con los dedos mojados. Denominó a su instrumento "órgano angélico". Actualmente también recibe los nombres de serafín y de carillón de vidrio.

Una campana de vidrio frotada se deforma igual que una percutida, pero sus movimientos son distintos. El principio que genera las vibraciones del vaso frotado es comparable al de la acción del arco sobre la cuerda de un violín, a saber, el proceso de adherencia-deslizamiento (*stick-slip*). El violinista recubre las crines del arco con colofonia (una resina) antes de tocar; el intérprete de la armónica de vidrio moja sus dedos. Cuando el arco entra en contacto con la cuerda, la adherencia (*stick*) hace que la estire, hasta que la fuerza de adherencia es inferior a la de retroceso, momento en que la cuerda se desliza (*slip*). El arco, continuando su movimiento, se adhiere de nuevo a la cuerda, que vuelve a ser estirada y así sucesivamente.

La fricción del borde superior de una copa excita su frecuencia propia más grave (la fundamental). Al producirse el ataque se emiten diferentes frecuencias, como en el caso de la campana, pero el mantenimiento de la vibración hace que la fundamental tenga mayor fuerza. Se crea una impresión musical de "pureza" y de "riqueza". Esta riqueza puede ser preocupante para el intérprete, pues una falta de agua, una presión o una velocidad de frotamiento inadecuadas al atacar una nota o cualquier otra causa semejante pudieran hacer sonar con mayor fuerza alguno de los armónicos. Es evidente que el intérprete se esfuerza por evitarlo, pero el problema no es demasiado grave, pues los armónicos se mantienen siempre en relaciones armoniosas. La riqueza de frecuencias permite que las relaciones entre notas sigan siendo placenteras incluso en casos que resultarían desagradables con otros instrumentos. El oído puede buscar, en el seno del espectro de dos notas muy cercanas, las relaciones que reducen las tensiones internas del acorde. Esta forma de generación de sonidos produce timbres que entusiasman a los oyentes. La tesitura va del *sol* de 97,99 hertz al *do* de 1046,5 hertz, es decir, cuatro octavas y un tercio (desde la nota grave del barítono hasta la nota aguda de la soprano; es comparable a la de una viola que emitiera notas más bien hacia los graves).





5. LOS VIDRIOS FROTADOS del serafín y de la armónica, así como las campanas de vidrio, suenan porque se deforman periódicamente cuando se los desplaza de su posición de equilibrio. Varios modos de vibración son simultáneos. En la parte superior se representan dos: los vasos alternan entre las dos curvas negras. La fotografía inferior muestra cómo vibra una copa con agua cuando se la excita por el método "deslizamiento-adherencia".

Los músicos crearon métodos de enseñanza y composiciones para el serafín, entre ellos Gluck (1714-1787). El repertorio utilizado está formado por obras originales, adaptaciones de música religiosa y melodías de moda. Esta tradición de música religiosa para el serafín continuará en los países anglosajones durante todo el siglo XIX.

Aunque el timbre encante, las dificultades de interpretación y las limitaciones técnicas restringen sus posibilidades. Es difícil mover el dedo a una velocidad uniforme sobre vasos inmóviles. En el siglo XVIII la afinación se obtenía gracias al llenado parcial de los vasos. El líquido modifica las vibraciones, porque incrementa la inercia del sistema, pudiéndose comprobar que cuanto más se llena el vaso, más grave resulta el sonido. Este tipo de afinación presenta sus inconvenientes, pues como el líquido se evapora, el intérprete tiene que reafinar con frecuencia el instrumento. La interpretación está limitada además en su tesitura, pues cuando se llena un vaso "suena" menos (se reduce la superficie oscilante) y el timbre se empobrece.

Estos inconvenientes se evitan utilizando vasos afinados previamente y que se mantienen siempre vacíos, pero la interpretación sigue siendo difícil. El serafín permite tocar acordes de hasta seis notas, pero con dificultades.

Benjamin Franklin perfeccionó el instrumento en determinado momento. Redactor de la constitución de los Estados Unidos, Franklin también fue el inventor del pararrayos, de chimeneas, de vasos de dos cámaras y de dispositivos de iluminación, amén de crítico musical y compositor. Asistió a muchos conciertos, frecuentando el salón de Mme. Brillon de Jouy. Fascinado por el timbre del serafín, hizo que su utilización fuese más musical resolviendo uno tras otro los problemas que se planteaban al intérprete y al compositor.

Franklin, inventor de la "armónica"

Empezó por afinar las copas (de modo que no se requiriera afinar el instrumento durante los conciertos modificando la cantidad de agua), que situó unas dentro de otras, de forma que se pudieran tocar acordes de diez notas. Instaló esta sucesión de copas sobre un eje que las hacía girar, mientras se colocaban los dedos mojados sobre ellas para ha-

cerlas vibrar por fricción. Bautizó a este instrumento con el nombre de "armónica", en homenaje a la música italiana y a la musicalidad de la lengua italiana.

Se pueden concebir armónicas diferentes a la de Franklin y que utilicen otros materiales distintos. Hay unos instrumentos chinos, denominados timbres, que también son semiesféricos, pero de latón, y hay unos cuencos tibetanos que funcionan con el mismo principio de vibración gracias a una baqueta que se frota por su borde superior. El presidente americano Thomas Jefferson fabricó un "bellarmonio" según el mismo principio de la armónica en el siglo XVIII, pero utilizando campanas metálicas; también pueden ser de porcelana (dando un timbre diferente).

¿Cómo crear las notas en estas condiciones? En el caso del violín la afinación se efectúa modificando la longitud o la tensión de la cuerda. En el caso de la armónica es el constructor quien afina, cambiando la talla de las copas o su rigidez. La frecuencia propia aumenta con la rigidez de la estructura, haciendo que los sonidos emitidos sean más agudos cuando se incrementa el grosor de las paredes y cuando se reduce el diámetro; a la inversa, se obtienen sonidos más graves reduciendo las paredes o aumentando el diámetro.

Las copas de vidrio de la armónica inician su proceso vibratorio por el efecto deslizamiento-adherencia, como los vasos musicales, pero debido al frotamiento lateral y no al realizado sobre el borde superior, o "labio". El inicio de la vibración es así más lento. El ataque de la campana de vidrio sobre el labio del serafín es más eficaz, pues es más fácil deformar un extremo libre. Mientras que puede tocarse con facilidad un *allegretto* con un serafín, con la armónica es imposible (para la misma calidad de vidrio, pues algunos tipos se comportan mejor que otros).

El sonido de la armónica y el del serafín son persistentes. Los vasos vibrantes continúan sonando incluso después de retirar los dedos y son posibles efectos de *vibrato*; naturalmente un *crescendo* se obtiene con una excitación sostenida. Si se hace subir y bajar el dedo por la pared, se obtiene un *vibrato* de altura (cosa que no puede hacerse con el serafín).

En resumen, el timbre etéreo y angelical de la armónica encantó a Mozart, a Beethoven, a Pleyel y a muchos otros compositores, poetas y artistas, que escribieron para él. Goethe decía que la armónica le hablaba el "lenguaje del corazón del mundo" y Paganini exclamó "¡Ah! ¡Qué voz! Realmente hace rezar..." Muchas veces se compusieron piezas para "pianoforte o armónica de vidrio", razón por la que es difícil descubrir el repertorio original. Todavía quedan muchas composiciones por descubrir.



6. EL SERAFIN es el primer instrumento en el que se utilizó el principio "deslizamiento-adherencia". Para afinar las copas había que llenarlas parcialmente con agua al comenzar. La evaporación del agua falseaba la interpretación. Hoy se prefiere afinarlas de modo definitivo reduciendo el espesor de sus paredes.

La armónica en medio del tumulto electrónico

Antes de que existieran los medios electrónicos de amplificación la armónica resultaba poco potente. Lo que se gana en posibilidades de interpretación por el hecho de colocar las copas en una caja se pierde en potencia sonora, ya que las ondas emitidas por una copa son absorbidas y desviadas por las vecinas. Por ejemplo, para grabar las interpretaciones con armónica hay que colocar el micrófono a los lados de las copas, pues al extremo del eje capta mal.

A pesar de la "dulzura" y de la "suntuosidad" de su sonido, el uso de la armónica fue haciéndose así cada vez más raro. Tenía la competencia del piano, al que se había adaptado un pedal de *forte*, lo que le hacía más potente y más expresivo. Además, los hábitos de audición musical habían cambiado a fines del siglo XVIII. Las orquestas tocaban en salas mayores y los instrumentos de viento tapaban el sonido de la armónica. Es indudable que su timbre gustaba a los espíritus prerrománticos, pero se adaptaba mal a la evolución de las costumbres y de los gustos. Frágil, costoso, de fabricación compleja y difícil de tocar, se acusó al instrumento de ser nefasto para la salud mental, siendo la causa de esta mala reputación su utilización por el médico alemán Franz Anton Mesmer en sus sesiones de hipnosis.

Mientras que la armónica declinaba, aparecían otros instrumentos que utilizaban vidrio. Por ejemplo, el físico alemán Ernst Chladni (1756-1827) inventó hacia 1780 el clavicilindro, en el que unas varillas metálicas son frotadas por un cilindro de vidrio. Después puso a punto el eufonio, en el que el intérprete frota una varilla de vidrio horizontal situada frente a él, la cual comunica su vibración a otra metálica afinada. Es el timbre metálico el que se oye, pues, de este instrumento. Como en el caso de los vasos musicales, el dedo se adhiere y se desliza; este movimiento anima la varilla de vidrio con una oscilación longitudinal de abajo hacia arriba.

A Chladni se le ocurrió este instrumento cuando estudiaba las frecuencias emitidas por una varilla metálica. En su instrumento el conjunto se apoyaba sobre unos tacos de corcho y sobre una caja de madera, de forma que las pérdidas de energía acústica eran considerables y el sonido resultante era muy débil. Los

hermanos Bernard y François Baschet ampliaron las posibilidades expresivas del instrumento hacia 1960, instalando el sistema sobre una placa de duraluminio y añadiendo unos conos de amplificación. El espectro así obtenido es el de una nota "pura", con un fundamental muy potente y bien definido. Los conos producen un efecto de reverberación que se utiliza para regular la potencia de interpretación y enriquecer el timbre.

La universalidad de los instrumentos de vidrio

Todos los países fabricantes de vidrio han construido instrumentos musicales con él. En India Meridional se utiliza el jalatharang desde hace siglos; los polacos, los belgas, los turcos fabricaron trompetas armónicas de vidrio... Los vidrios utilizados en todos los casos eran a base de óxido de silicio, con otros productos destinados a rebajar la temperatura de fusión: carbonatos de calcio y de potasio y óxidos de aluminio en el caso de los vidrios más comunes; carbonato de potasio sólo para los vidrios sonoros.

Para examinar la gran variedad de instrumentos de vidrio conviene acudir a la clasificación general de los instrumentos musicales según sus modos de generación de sonido, de interpretación y de fabricación. Dentro del amplio grupo de instrumentos de percusión se distinguen los idiófonos (golpeados, pinzados, frotados), los membranófonos (percusiones de parche), los cordófonos, los aerófonos y los instrumentos electrónicos. La mayor parte de ellos puede construirse con vidrio, pero la opción no siempre es interesante. Así, una trompeta de vidrio no tiene ninguna calidad musical especial y un violín de vidrio puede que estimule a la imaginación, pero en términos de amplificación de los modos vibratorios de las cuerdas y de su transmisión a través del puente no presenta ninguna ventaja.

La mayoría de los instrumentos prácticos de vidrio se incluyen entre los idiófonos, que producen sonido por sus vibraciones propias, sin necesidad de columnas de aire, de membranas ni de cuerdas. La armónica, el serafín, las campanas, el cristalófono y el glacecordo utilizan el vidrio como cuerpo vibrante y como elemento resonante.

Entre los cordófonos, la trompeta marina utiliza el vidrio. Una única

El vidrio frotado y el sonido producido por una cinta adhesiva

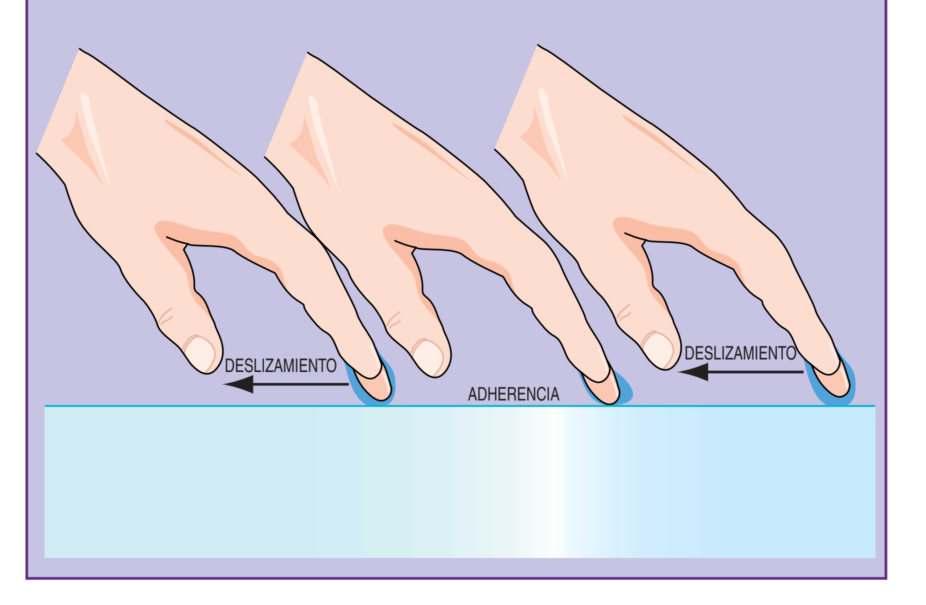
¿A qué se debe que vibre el vidrio frotado? A causa del fenómeno deslizamiento-adherencia. Este principio de emisión sonora actúa en situaciones variadas: cuando se toca el violín, cuando se desliza el dedo sobre una superficie húmeda, cuando se extrae de un dispensador un trozo de cinta adhesiva o cuando se rompe un cuerpo sólido. Examinemos el último caso.

Romper un sólido es crear una fisura a partir de un defecto preexistente, provocando su propagación. Esta propagación consume energía, pues hay que romper los enlaces interatómicos. La energía se aporta primero bajo la forma de una fuerza que deforma el material hasta los limites de su elasticidad. Cuando se rompen los vínculos químicos que garantizan la cohesión, aparece la fisura, liberándose bruscamente la energía de los enlaces. La velocidad de propagación de la fisura depende de la diferencia entre la tasa de restitución de energía y la energía superficial, es decir, la energía necesaria para romper los enlaces químicos. En el caso de un material elástico ideal la fisura se aceleraría hasta alcanzar la velocidad de las ondas de Rayleigh (es decir, la velocidad del sonido). En el caso de las sustancias reales una parte de la energía se pierde en forma de energía acústica, cesando momentáneamente la propagación de la fisura, que continuará cuando la fuerza vuelva a ser suficiente.

Se puede estudiar este proceso con un dispensador automático de cinta adhesiva, que se conecte a un sistema que mida la fuerza con que se tira de la cinta. Las experiencias, una vez interpretadas mediante un modelo teórico adecuado, demuestran que las oscilaciones son sinusoidales o tienen forma de diente de sierra, según sea la inercia del sistema.

El fenómeno es igual en el caso de los vasos frotados, pero se complica por la presencia del líquido. Cuando se moja el dedo y el agua penetra por capilaridad en los intersticios de la piel, se facilita el deslizamiento. El desplazamiento del dedo deja agua sobre el vidrio, por el mismo principio que hace que un pincel deposite pintura sobre una pared (la velocidad de un líquido es nula cuando entra en contacto con un sólido). Tras desplazarse una corta distancia (deslizamiento), el dedo se seca, de forma que ya no se desliza; es la fase de adherencia. El agua que rodea la zona seca vuelve a mojar el dedo por capilaridad, repitiéndose el deslizamiento.

—Michel Barquins







7. ARMONICA DE VIDRIO DEL SIGLO XVIII. El eje que soporta las copas es accionado por un pedal. El instrumento ha sido modernizado. Un motor eléctrico acciona el conjunto al tiempo que un nebulizador mantiene húmedos los dedos del intérprete.

cuerda está tensada sobre un puente móvil, que no tiene más que un punto de apoyo sobre la caja de resonancia. Cuando la cuerda entra en vibración, este apoyo percute periódicamente sobre una pequeña placa de vidrio, engendrando un sonido seco. El efecto obtenido cuando se tocan sólo las notas armónicas de la cuerda es el de una trompa o un cuerno de caza. La placa también puede ser de metal o de marfil; el constructor del instrumento elige el material según el timbre que quiera darle.

Los aerófonos en los que haya algún elemento de vidrio son muy variados. Se han construido órganos de vidrio (con tubos cerrados, como la flauta de Pan en vidrio), flautas traveseras (tubo abierto), trompas rectas, embocaduras de clarinete y saxofones de vidrio. Estos instrumentos son de difícil construcción, pero son espléndidos. La utilización de mezclas de vidrio para su realización se justifica por la muy baja dilatación de los vidrios de óxidos. Las flautas metálicas, por ejemplo, tienen el inconveniente de alargarse y de acortarse de acuerdo con las variaciones de temperatura, ya sean del local o del propio instrumento calentado por el intérprete. Suelen construirse de varias piezas, que se ensartan unas dentro de otras. Al observar la pequeña dilatación del vidrio, el fabricante francés Claude Laurent tuvo la idea de utilizarlo para construir unas bellas flautas de cristal a comienzos del siglo XIX; hoy se utilizan distintas clases de vidrio con este mismo fin. Esta baja dilatación interesó a algunos fabricantes de flautas de Pan y de órganos. Estos últimos utilizaron botellas siguiendo el principio de las flautas cilíndricas, haciendo vibrar la columna de aire interior merced a un chorro de aire lanzado sobre el borde de la botella. Con botellas de tamaños diferentes se obtienen notas diferentes.

Pertenecen a la familia de los idiófonos las armónicas, el serafín y las campanas, de los que ya hemos hablado, y también otros instrumentos inventados a partir del Renacimiento. Por ejemplo, el cristalófono (vibráfono con láminas de vidrio) ha sido perfeccionado. El eufonio utiliza el vidrio como elemento excitador. Los vasos musicales y la armónica ocupan una posición especial dentro de este grupo. Son los únicos instrumentos a él pertenecientes que emiten sonidos de alturas distintas y definidas por fricción, junto a la sierra musical. El fabricante de serafines y de armónicas que no se limite a la utilización de copas corrientes, puede explorar formas variadas, que faciliten la interpretación, mejorando el timbre y aumentando la potencia sonora. Para conseguir estas optimizaciones habrá de tener en cuenta la excitación particular que se utiliza. El frotamiento de los labios en el serafín y el de las zonas adyacentes en el caso de la armónica generan sonidos diferentes. Lo que se busca en estos casos son timbres “cálidos y redondos”, así como la persistencia del sonido, que permita explorar nuevos horizontes sonoros gracias a las notas sostenidas.

Son posibles otras mejoras. Por ejemplo, yo he motorizado el instrumento (que antes era accionado por un pedal) y lo he equipado con un nebulizador, que mantiene constante la humedad de los dedos del instrumentista.

Hoy se entienden las causas de las sorprendentes vibraciones de los instrumentos de vidrio, pero la comprensión de los fenómenos físicos no agota la poesía que se desprende de los timbres, variados y raros, de este instrumental. El público contemporáneo considera siempre “nuevos” y expresivos a estos instrumentos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOS SONIDOS DE LA MÚSICA. John R. Pierce, Prensa Científica, Barcelona, 1985.

STICK SLIP AND PEELING OF ADHESIVE TAPES. Daniel Mougis y Michel Barquins, en *Adhesion*, vol. XII, págs. 205-222, K. W. Allen, Elsevier, Londres, 1988.

NEXOS

James Burke

No es oro todo lo que reluce

El pasado diciembre llegaron desde Francia noticias sobre los daños causados por una feroz tormenta caída sobre la capital. El meteoro había arrancado pedazos de la imponente catedral de Notre Dame. Contra lo que pudiera pensarse, apenas me inquieté. Motivos tenía.



La pulverización de gárgolas desprendidas al chocar contra el suelo me hizo recordar al gran machacador de Notre Dame. René Just Haüy se pasó la vida moliendo cristales e inventó la moderna teoría reticular de la formación cristalina, amén de ser un experto en piroelectricidad. Haüy, sacerdote además de científico, recibió de Napoleón una canonjía honoraria de Notre Dame, prebenda con la que le agradecía la publicación de un manual de física para el nuevo sistema escolar francés. Trocó sus iniciales aficiones botánicas por la mineralogía tras acudir a las lecciones que dictaba Louis Jean Marie Daubenton. Este era, entre otras cosas, guía de las visitas al Jardin des Plantes parisino y se labró un nombre con un artículo sobre un método para clasificar crustáceos (sin duda bien recibido por sus superiores gastrónomos).

Puede decirse que Daubenton inventó la paleoanatomía comparada. También investigó el crecimiento del tronco de las palmeras y se convirtió en el mayor perito francés en lana merina y en cualquier actividad reproductora que se pueda imaginar con carneros y ovejas. El París revolucionario de 1793 le otorgó un certificado de ciudadano ejemplar, de profesión ‘pastor’. Para redondear su perfil, sépase que cuando hacía referencia a los escasos momentos que dedicaba a la literatura decía que era para poner su mente “a régimen”.

Etienne Geoffroy Saint-Hilaire fue ayudante de Daubenton y profesor de cuadrúpedos, cetáceos, aves, reptiles y peces. Acabó un poco chiflado, pero antes de ello, estamos en 1821, publicó una teoría ingeniosa (cuasievolucionista) según la cual las especies podían cambiar y adoptar formas inexistentes en el Gran Plan Original, en las raras ocasiones en que la naturaleza cometía algún error (o se desviaba del magno proyecto) y generaba un monstruo (una especie nueva). Su artículo titulado ‘Disertación sobre la clasificación de los monstruos’ supuso el bautismo de la ciencia de la teratología (el estudio de las malformaciones).

No faltará quien diga que sacó tan monstruosas ideas (allanadoras del camino de Darwin) del primer estudio riguroso sobre malformación, que había sido acometido por un británico eximio del siglo XVII, William Harvey, médico del rey. Obsesionado con el tema de la gallina y el huevo, Harvey también es el tipo del que se nos cuenta que hizo historia de la medicina con un libro, impreso en 1628, sobre la circulación de la sangre. A mí me gusta lo que no suele contarse: creía que la sangre transportaba el alma y el calor y que se calentaba al fermentar en el corazón.

Para infortunio de Harvey, entre los gajes que tenía el hecho de ser rico y famoso en la Inglaterra del siglo XVII se encontraba el de que la vida propia podía ser glosada por el corrosivo de siempre, el plumilla ante cuyas ácidas ocurrencias no puede evitarse la sonrisa (salvo que versen sobre uno mismo). Me refiero a John Aubrey, cuyas principales actividades fueron la crónica de diversos aspectos de la vida inglesa y la continua huida de mujeres litigantes. Lo mejor que se ha dicho de sus ensayos sobre políticos y famosos (“Vidas breves”) es que no hay que conceder crédito ni a una sola palabra de sus chismes. Si libró el pellejo fue porque tenía un protector con amigos en las altas (léase reales) esferas: Sir William Petty, político y economista, que fue quien concibió la idea de la balanza comercial. También fue coautor del primer libro de estadística. Tan corto de vista era que, desafiado a duelo y, por tanto, con libertad para escoger arma y campo, pidió: “Hachas, en un sótano oscuro.” El retador optó por retirarse.

De joven, Petty se había enrolado como grumete. Cayó tan mal entre la marinería, que lo abandonaron en la costa francesa. Allí se quedó, recibió una educación gala y terminó en París, codeándose con los intelectuales del círculo del padre Mersenne, quien relacionó a tantos sabios que se diría que utilizaba Internet por anticipado. Mersenne también encontró tiempo para sus propias investigaciones acústicas. Calculó que la intensidad de un sonido era inversamente proporcional a la distancia al generador.

Un profesor de música italiano, Giuseppe Tartini, descubrió en 1754 que, si se tocaban con fuerza y simultáneamente dos notas, se escuchaba una tercera. También aplicó el álgebra y la geometría a la música, elaborando cálculos que luego fueron calificados de “seriamente inexactos”. Pero dirigió una de las mejores escuelas de violín de Italia, en la que introdujo el estilo moderno de

manejar el arco. Ya sólo faltaba el prototipo moderno, que en 1786 desarrollaría en París François Tourte, en una época en que intérpretes y compositores buscaban un mejor arco para conseguir sonidos más expresivos. Tres años más tarde, y con sólo siete, el pequeño Niccolò Paganini puso su mano sobre un arco, el primero de una carrera que arrancaría los sonidos más expresivos que jamás se hubieran escuchado antes y puede que después. Los críticos se quedaron sin superlativos para ponderar al inventor del virtuosismo. Se dice que, a veces, por puro placer, cortaba dos cuerdas de su violín y terminaba la obra de forma perfecta con las dos restantes.

Puesto que siempre hay necesitados, invirtió una fortuna en Hector Berlioz, para que el compositor pudiera expresar su genio (a pesar de la total indiferencia de los críticos parisinos) y pudiese alimentar a su mujer, una actriz inglesa de segunda fila. Se llamaba Harriet Smithson y, como Berlioz, lo único que cosechaba eran críticas despectivas, si exceptuamos algunas palabras agradables de cierto libretista de su marido, el poeta Théophile Gautier, que también tenía sus propias responsabilidades económicas: dos hermanas, tres niños y dos queridas.

Gautier era muy apreciado por sus compañeros de pluma por su ideal del arte por el arte, donde sólo la belleza es soberana, por su poesía (deleite de quienes disfrutan con la enésima versión del más de lo mismo) y por su crítica literaria (lectura obligada para los que acudían a los salones). Pero Gautier y compañía no participaban del particular circuito de cócteles de la época (1840), ya que frecuentaban las sesudas sesiones que se celebraban en casa de Victor Hugo, donde los románticos hablaban sobre sí mismos entre ellos.

Uno de los narcisistas asistentes era Prosper Mérimée, de quien ya hemos hablado y quien, además de novelar el ayer, era Inspector General del Pasado Francés (esto es, encargado de los monumentos históricos). Su misión principal era la de apuntalar los que amenazaban ruina. Gran parte del trabajo de reparación lo realizó un protegido suyo, el arquitecto Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, cuyas ideas posteriores sobre el uso de estructuras de hierro con paredes de obra exentas de carga tuvieron mucho éxito en Chicago y ayudaron a quienes daban forma al paisaje urbano americano mediante rascacielos. El duque (el apodo es mío) escribió no menos de 16 volúmenes sobre la historia de la arquitectura francesa y estaba loco por el gótico. Tan chiflado que, en cuanto se acercaba a algo restaurable, lo que no le gustaba (o lo que faltaba) lo reinventaba con su fértil imaginación estilo Disney. Motivo por el cual mucho de lo que restauró de los antiguos edificios franceses es falso.

Como aquellos pedazos de catedral cuyo destrozo no lamenté al principio. Y es que el material gótico que se precipitó al suelo en diciembre pasado... no lo era.

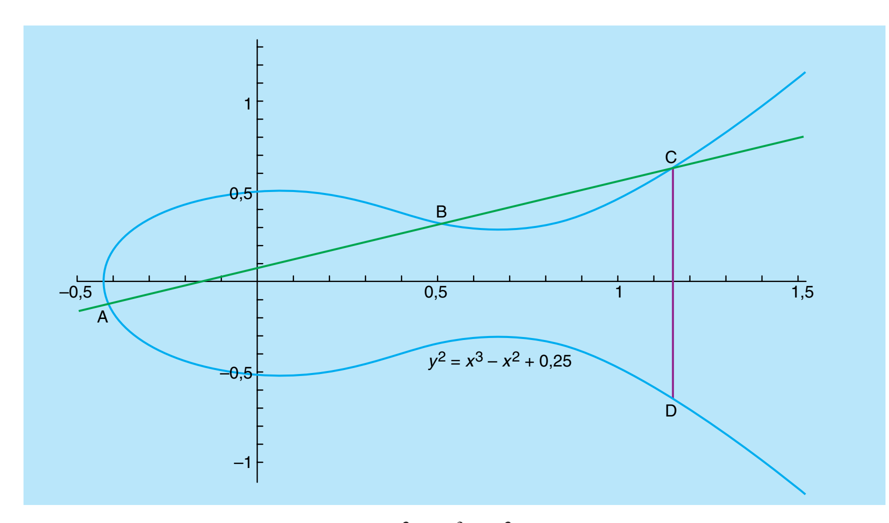
Curvas y números

Es muy posible que el logro más difundido de las matemáticas en el siglo XX haya sido la demostración del último teorema de Fermat. Como probablemente sepan ya los lectores de *Investigación y Ciencia*, Pierre de Fermat enunció este resultado en el margen de un tratado de Diofanto, un matemático alejandrino, añadiendo que daría la demostración en otro lugar, por ser el margen demasiado estrecho. La demostración, si la hubo, se encuentra en paradero desconocido desde hace tres siglos y medio; Andrew Wiles terminó por ofrecer otra en 1993, con métodos muy distintos de cuanto Fermat pudiera saber. El logro de Wiles comportaba una solución parcial de otro difícil problema, conocido por conjetura de Shimura-Taniyama-Weil, que ha sido al cabo plenamente demostrada por Christophe Breuil, Brian Conrad, Fred Diamond y Richard Taylor.

El teorema de Fermat afirma que, para cualquier $n \geq 3$, la única solución con números enteros de la ecuación $a^n + b^n = c^n$ es la trivial, en la que a, b y c son iguales a cero. En el caso $n = 1$ existen, obviamente, infinitas soluciones y también es así cuando $n = 2$; la más conocida es $a = 3$, $b = 4$, y $c = 5$ (un triángulo rectángulo de lados enteros). La inexistencia de soluciones de este tipo para valores superiores de n es muy sorprendente; pero la idea de que el problema habría de ceder con un poco de manipulación algebraica resulta tentadora. No es así: todos los esfuerzos de los matemáticos profesionales y aficionados para demostrar de tal modo el caso general concluyeron en el fracaso.

La brecha fue abierta desde otra dirección, a saber, la teoría de curvas elípticas, curvas definidas mediante ecuaciones cúbicas de la forma $y^2 = x^3 + px + q$ que ligan dos variables, x e y, que se pueden interpretar como las coordenadas cartesianas de puntos del plano (*véase la figura*). Poseen tales curvas propiedades notables, que han embelesado a los matemáticos durante siglos. Séame permitido citar al menos una: toda curva elíptica tiene una estructura natural de grupo. La teoría de grupos constituye la formulación matemática de la simetría; un grupo matemático es, en esencia, un conjunto de elementos que combinados a pares producen otro elemento del grupo.

La operación de grupo admite una definición geométrica en el caso de una curva elíptica. Dados en la curva dos puntos cualesquiera, A y B, al unirlos mediante una línea recta ésta interceptará a la curva en un tercer punto C (pues la ecuación que define la curva es de tercer grado). Al aplicar a la curva una simetría respecto al eje x, la curva, en su conjunto, permanece invariante, pero el punto C se transforma en el punto D. El procedimiento de construcción del punto D a partir de los A y B define sobre la curva una composición de puntos que cumple una de las leyes de los grupos, a saber, es asociativa, es decir, para cualesquiera puntos X, Y, Z de la curva, son iguales las composiciones X(YZ) = (XY)Z. La estructura de grupo exige otras dos condiciones: la existencia de un elemento identidad, o neutro, y la existencia del inverso de cualquier elemento. La composición de puntos en las curvas elípticas cumple también estos dos requisitos.



Una curva elíptica de la forma $y^2 = x^3 - x^2 + 0,25$. Las curvas elípticas merecen ser estudiadas porque poseen de forma natural una estructura de grupo. La operación del grupo se define conectando mediante una línea recta los puntos A y B, prolongándola hasta hallar un tercer punto, C, y tomando como resultado el punto D, simétrico de C respecto al eje x

Hace cincuenta años que Shimura, Taniyama y Weil conjeturaron que todas las curvas elípticas habrían de ser "modulares", propiedad que se explica en el recuadro. En matemáticas se llama conjetura a una proposición que se juzga verdadera, pero que aún no ha podido ser demostrada.

El interés por la conjetura de Shimura, Taniyama y Weil se reavivó en 1996, cuando Gerhard Frey y Ken Ribet observaron que si los enteros a, b y c fueran solución de la ecuación de Fermat $a^n + b^n = c^n$, entonces la curva $y^2 = x(x - a^n)(x - b^n)$ sería elíptica, pero no modular. Lo que Wiles hizo fue demostrar la conjetura de Shimura, Taniyama y Weil en el caso particular correspondiente a la curva de Frey-Ribet. Ello bastaba para demostrar el teorema magno de Fermat y para conferir a Wiles celebridad inmediata, pero el caso general seguía pendiente de demostración. Lo cual han logrado ahora Breuil, Conrad, Diamond y Taylor.

Es la suya una demostración notable, porque pone en relación dos objetos que aparentemente no tienen nada que ver: las curvas, de una parte, y las funciones de variable compleja, de la otra. A cada curva se le puede asociar una sucesión de números enteros (que son, en esencia, sus coeficientes de Fourier). Breuil, Conrad, Diamond y Taylor han probado que para cada curva elíptica es posible hallar una función especial que tiene la misma sucesión. Su éxito tiene fructíferas consecuencias matemáticas. Por

Curvas elípticas y sucesiones de números enteros

¿Qué significa que una curva sea modular? Dada una curva elíptica $y^2 = x^3 + px + q$, se desea saber si posee soluciones enteras, es decir, puntos cuyas coordenadas sean ambas números enteros y, de ser así, cuántas tiene. Se trata de un problema muy complicado, que cabe simplificar reemplazando el plano por un retículo periódico.

Para ello se procede del siguiente modo. Se elige un número primo, k, y se asocia a cada número entero x el resto x_k de su división por k (por lo que $x_k = 0$ cuando x sea múltiplo de k). Cada punto del plano (x, y) pasa a tener ahora coordenadas (x_k, y_k), de modo que el plano entero queda reducido a un retículo periódico, de dimensiones $k \times k$, que solamente contiene k^2 puntos.

Puede estudiarse la misma ecuación, $y_k^2 = x_k^3 + px_k + q$, en el retículo. Denotemos por $n(k)$ el número de soluciones de esta ecuación en función de k. Por ejemplo, si la curva elíptica considerada fuese $y^2 = x^3 - x^2 + 1/4$, se obtendrían los siguientes números: $n(2) = 4$, $n(3) = 4$, $n(5) = 4$, $n(7) = 9$, ..., $n(10.007) = 9989$, ...

Es evidente que las soluciones de la ecuación en el retículo están relacionadas con las soluciones enteras de la ecuación en el plano, por lo que la sucesión infinita $n(k)$ contiene, codificada de alguna forma, cierta información aritmética sobre la curva elíptica objeto de estudio.

La misma información se encuentra codificada en los coeficientes de Fourier de una función analítica $f(z)$, que admite expresión explícita en forma de producto infinito, que no daremos aquí. Esta función es modular, lo que significa que posee ciertas propiedades aritméticas especiales. La afirmación de que todas las curvas elípticas son modulares significa que cada una de ellas está relacionada con una función modular.

ejemplo, ahora es fácil demostrar generalizaciones del último teorema de Fermat. Pudieran obtenerse también otros beneficios inesperados: las curvas elípticas se utilizan mucho en los sistemas de encriptación con clave pública; ahora se dispone de un nuevo método para su análisis. ¡Cuidado, banqueros!

IVAR EKELAND
Universidad Paris-Dauphine, Francia

Demografía

Expectativas de una vida más larga

La duración media de la vida de los primeros seres humanos era de unos veinte años, según permiten estimar los restos óseos. La misma cifra ronda actualmente los ochenta años en ciertos países industrializados. Buena parte de este aumento se ha producido en el último siglo y medio y en general se pensaba que, a medida que la esperanza de vida se acercara a lo que se llamaba el 'límite biológico de longevidad humana', el descenso de la mortalidad iría disminuyendo hasta desaparecer.

Tal deceleración todavía no se ha producido. Tuljapurkar y sus colaboradores acaban de demostrar que las tasas de mortalidad específicas por edad han continuado su descenso a ritmo constante durante la segunda mitad del siglo XX en los países industrializados del G7 —Estados Unidos, Canadá, Japón, Francia, Alemania, Italia y el Reino Unido—, sin que se hayan observado indicios de modificaciones en la tendencia. Este estudio aparece dos años después del que publicara Wilmoth, en el que se indicaba que la reducción de la mortalidad en los Estados Unidos, medida según la tasa de mortalidad estandarizada por edad, fue aún más rápida en la segunda mitad del siglo que en la primera.

Suponiendo que el ritmo de disminución de la mortalidad se mantenga estable, se predice que la esperanza de vida al nacer aumentará más rápido de lo previsto por los gobiernos de los países del G7. Vale decir que la población anciana será aún más numerosa de lo esperado según las predicciones oficiales. Ello pudiera entrañar un incremento de los gastos médicos y de la demanda de cuidados de larga duración, así como de mayores pagos de pensiones y de otros servicios en función del estado de salud general de esta población.

Estos datos plantean al menos dos preguntas, muy relacionadas entre sí. ¿Por qué no se ha observado una disminución del descenso de la mortalidad? ¿Se mantendrá tal descenso en el futuro? Los estudios demográficos, epidemiológicos, de biología del envejecimiento y de la longevidad proporcionan algunas pistas. Al descenso constante de la mortalidad subyacen variaciones en los patrones de su reducción. En la segunda mitad del siglo XIX y en la primera del XX se produjo un notable descenso del número de muertes debidas a enfermedades infecciosas y parasitarias, a desnutrición y a enfermedades asociadas con el embarazo y el parto. La reducción fue pronunciada en el caso de niños y jóvenes, pero más modesta entre los ancianos. Se dedujo de ello que las posibilidades de prolongar la esperanza de vida se agotarían una vez el descenso de las tasas de mortalidad a edades tempranas y medias las situara a niveles muy bajos.

Pero al hacer estas consideraciones no se tenían en cuenta, ni podían tenerse, los avances que se producirían en la segunda mitad del siglo XX. La mortalidad atribuida a las enfermedades degenerativas, especialmente cardiopatías y accidentes cerebrovasculares, empezó a descender. La reducción fue más pronunciada entre los ancianos, de modo que hubo quienes lo atribuyeron sencillamente a que se posponía la muerte de los enfermos graves. Pero la salud de los ancianos estadounidenses mejoró notablemente en los años ochenta y noventa del siglo XX, señal de que la prolongación de la vida a edades avanzadas se debía principalmente a una mejor salud y no a la mayor supervivencia de los enfermos.

Todavía podría añadirse otro matiz en la reducción de los patrones de mortalidad. A pesar del claro descenso de las muertes por enfermedades degenerativas, durante muchos años se mantuvo estable la mortalidad general por cáncer. Pero hacia 1990 se inició en los países ricos su deseado descenso. Resta por comprobar si persistirá dicha tendencia.

La existencia de un límite biológico a la longevidad humana se considera dudosa actualmente. Los biólogos creían antes que el proceso de senescencia estaba programado en el reloj biológico humano. Pero, según la idea que prevalece ahora, el envejecimiento se debe a la imperfección de los mecanismos de conservación y de reparación del organismo, que favorecen la acumulación continuada de alteraciones no reparadas de macromoléculas, células, tejidos y órganos. Los avances de la investigación sobre el envejecimiento pudieran conducir a nuevos enfoques

médicos que redujesen las tasas de lesiones acumuladas.

Los conocimientos actuales permiten adelantar la idea general de que los desarrollos científicos, técnicos y económicos conducirán a un tratamiento más eficaz de las enfermedades degenerativas y de los procesos de envejecimiento, lo que permitiría que se mantuviera estable el rápido ritmo de descenso de la mortalidad. Pero estas expectativas están supeditadas a otras. Siguen apareciendo nuevas amenazas contra la salud y la supervivencia, como las que representan el surgimiento de nuevas enfermedades infecciosas y la reactivación de las antiguas, el incremento de la contaminación y la proliferación de los armamentos nuclear, biológico y químico. Si se fracasase en el manejo de estos riesgos, se perdería parte de la ganancia en esperanza de vida lograda en el último siglo y medio.

¿Qué sucede a extramuros de las naciones G7? Las predicciones de una esperanza de vida superior a los ochenta años se limitan de momento a estos y a otros países de economías de mercado muy desarrolladas. En su mayoría pertenecen a Europa occidental, a Norteamérica y al Este asiático. La esperanza de vida promedia en el resto del mundo es inferior a los sesenta y cinco años. En el Africa subsahariana no llega a los cincuenta y pudiera descender todavía más por la epidemia de sida, que se suma al estancamiento económico y a los conflictos políticos. Algunos países industrializados de Europa del Este y de la antigua Unión Soviética no han experimentado más que tenues aumentos de la esperanza de vida, con descensos ocasionales incluso.

No resulta sorprendente que las previsiones oficiales de la esperanza de vida y del tamaño de la población anciana en los países del G7 sean mucho más conservadoras que las de Tuljapurkar y sus colegas. Los gobiernos nacionales, las organizaciones internacionales y los investigadores del pasado efectuaron de manera casi invariable predicciones a la baja de la esperanza de vida en los países industrializados con economía de mercado. Por ejemplo, las Naciones Unidas prepararon en 1984 unas proyecciones internacionales de población basadas en la premisa de que la esperanza de vida máxima de las poblaciones humanas era de setenta y cinco años para los varones y de 82,5 para las mujeres. Pronto se vio que estaban equivocados. En Japón, por citar un caso, los datos de 1998 ya eran de 77,2 y 84 años, respectivamente. La razón de tal infraestimación débese, por una parte, a los propios especialistas, que, al realizar estas predicciones, consideran que las estimaciones más conservadores son menos polémicas y más "seguras". La segunda razón es que suelen extrapolarse las tendencias de antaño en punto a tasas de mortalidad específica por edad o por causa (o de ambas a la vez), con lo que se pierde la oportunidad de incluir las transiciones futuras en los patrones de reducción de la mortalidad por causa específica y por edades.

SHIRO HORIUCHI
Universidad Rockefeller, EE.UU.

Luna, mareas y clima

La opinión de que gran parte de la energía de las mareas oceánicas se disipa en las aguas profundas y no en las someras de las costas encuentra ahora apoyo en las observaciones. Los resultados sirven también curiosamente para que se comprenda mejor el cambio climático.

La Luna se aleja de la Tierra a razón de unos cuatro centímetros por año, según medidas realizadas usando reflectores de láser instalados allí por astronautas. ¿Qué tiene que ver este movimiento con la circulación oceánica? Según las leyes de Kepler, el alejamiento implica que se está produciendo una continua pérdida de energía del sistema Tierra-Luna de 3×10^{12} watt, o 3 terawatt, en su mayor parte en los océanos. Pero ¿en qué parte de los océanos se produce y cuáles son sus efectos? Hay pruebas a favor de la aparentemente lunática conclusión de que la disipación de la energía de las mareas en las aguas oceánicas profundas y la mezcla resultante son factores que rigen la circulación oceánica global.

Suelen describirse los océanos diciendo que poseen una circulación superior, regida por los vientos, que origina enormes corrientes casi superficiales, como las del Golfo, el Kuroshio y la corriente antártica circumpolar. Superpuesta a esta circulación existe otra, frecuente e incorrectamente llamada "termohalina", que se supone impulsada por contrastes de densidad superficial debidos a variaciones de temperatura y de salinidad, producidas por la pérdida de calor hacia la atmósfera y por la evaporación inducida por los vientos. El proceso consiste en que las aguas densas se hunden en las latitudes superiores debido a la convección, impulsando una "circulación meridiana de subversión", que muchos creen ser la que domina los balances de calor y de agua dulce del sistema climático. (La dificultad terminológica de la "circulación termohalina" deriva de que, por ejemplo, la mitad del transporte de calor en el océano Pacífico Norte se realiza por la circulación superficial gobernada por los vientos.)

Casi todos los modelos del clima terrestre, tanto teóricos como numéricos, consideran que las aguas densas que la circulación meridiana de subversión hunde a grandes latitudes fluyen después por todo el mundo próximas a los fondos oceánicos, regresando a la superficie mediante un afloramiento uniforme a través del océano "interior". Bajo la sencilla hipótesis de que un afloramiento uniforme de agua fría es compensado por una mezcla uniforme hacia abajo de aguas más cálidas a lo largo de toda la columna de agua, se alcanza un régimen estacionario. Casi todos los modelos numéricos de los océanos y de los sistemas climáticos representan este proceso mediante coeficientes de intercambio turbulento vertical espacialmente constantes, cosa que también hacen las teorías de los libros de texto.

Pero ha quedado claro que la circulación real es mucho más sutil e interesante. Tomando en consideración la estabilidad y los flujos de energía de un fluido cuya superficie se calienta y se enfría se ve que el movimiento resultante sería extremadamente débil, equivaliendo a una difusión lenta. Tal sistema fluido es estable y en régimen estacionario no puede producir las vigorosas corrientes que se observan en las profundidades oceánicas. No puede existir una circulación de importancia apreciable que esté primordialmente impulsada por la convección.

Ya hacia 1970 estaba claro además que la idea de una mezcla vertical uniforme no era correcta en las regiones oceánicas superiores. Tanto las medidas directas de turbulencia como los experimentos de difusión de colorantes han mostrado la debilidad de la mezcla desde la superficie hasta el fondo oceánico en el océano abierto. En cambio confirman una vieja hipótesis, la de que el océano está bien mezclado principalmente en sus bor-

des, incluyendo las zonas de contacto con las crestas mesoceánicas, donde las velocidades locales de mezcla son varios órdenes de magnitud mayores que en el interior del océano. La confianza que casi todos los modelos numéricos de circulación depositaban en la mezcla uniforme en el interior de los océanos pone en cuestión las deducciones sobre la física de la circulación basadas en ellos. No hace más de dos años que han terminado por aparecer algunos modelos que eliminan tal mezcla.

Es sorprendente lo que se ha tardado en reconocer que la necesidad de una fuente de energía que mantenga la mezcla vertical (que haga ascender agua más densa en el seno de otra que lo es menos) ha de tener importantes consecuencias. Las dificultades que se producen cuando se intenta impulsar los movimientos fluidos por el calentamiento superficial y por la evaporación indican que una fuente mecánica de energía no sólo tiene que gobernar las corrientes directamente impulsadas por los vientos, sino también las componentes de la circulación meridiana de subversión en las aguas profundas. No puede haber más que dos candidatos a ser tal fuente: los vientos y las mareas.

Durante más de tres cuartos de siglo se creyó que las mareas se disipaban casi completamente por rozamiento de las aguas someras sobre las plataformas continentales. Pero Munk y yo llegamos a la conclusión de que aproximadamente la mitad de la energía requerida para elevar las aguas profundas hasta la superficie procedía de la mezcla impulsada primordialmente por disipación de la energía de las mareas —principalmente lunares, pero también en parte solares— en las profundidades oceánicas (*véase la figura*). Egbert y Ray han obtenido ahora una estima observacional de un terawatt de disipación de las mareas en el océano abierto, ajustando un modelo dinámico a las medidas altimétricas de las mareas por medio de satélites. Sus cifras no son definitivas, pero concuerdan con los valores de las energías requeridas para el afloramiento profundo y con las pérdidas totales de energía —la superficial (unos 2 terawatt) y la profunda— que implica la recesión lunar.

Si la hipótesis de que las velocidades a las que el océano transporta aguas calientes y frías están regidas por mecanismos impulsados por las mareas y por el viento sobrevive a ulteriores comprobaciones, se deducirán varias consecuencias. Una es que se pondrá en duda hasta qué punto los modelos de mezcla uniforme del océano puedan predecir las circulaciones actuales ni las respuestas a cambios externos. También induce a pensar que el factor limitante de la velocidad de transporte de calor por los océanos no sea primordialmente el gradiente de densidad superficial del océano, sino más bien la fuerza y la configuración de los vientos y la distribución de las mareas.

¿Cuáles serían las consecuencias si la hipótesis fuese correcta? Una es que se necesitaría conocer las configuraciones de la circulación atmosférica en gran escala al considerar los cambios climáticos pasados y futuros. El nivel del mar estaba unos 130 metros más abajo durante el último máximo glacial que actualmente. Esta configuración eliminaba gran parte de las actuales regiones de disipación de energía por aguas someras y alteraba las mareas en los océanos profundos, afectando presumiblemente al transporte de calor oceánico. La totalidad de la configuración continental fue diferente durante períodos todavía más largos del pasado, con distribuciones de mareas y de mezclas radicalmente distintas. Parece pues que las mareas son, sorprendentemente, una parte intrincada de la historia de los cambios climáticos, como lo es la historia de la órbita lunar.



Generalmente no se ha creído que la Luna tuviera nada que ver con la circulación general de los océanos. Pero hay un personaje de la literatura rusa, el soldado Kozma Prutkov, que, aun siendo un perfecto bobo, solía dar con las respuestas adecuadas. Preguntado sobre cuál fuese más importante, si el Sol o la Luna, contestó: "La Luna, desde luego, porque el Sol no brilla más que durante el día, cuando de todas maneras ya hay luz..."

CARL WUNSCH
Instituto Tecnológico
de Massachusetts, EE.UU.

Quiralidad, magnetismo y luz

Una tortuosa indagación, en la que han participado numerosos físicos, químicos y biólogos durante más de 150 años, ha concluido finalmente con un artículo de Rikken y Raupach, publicado en la revista *Nature* en junio de este año. Los autores exponen en él la primera aplicación inequívoca de un campo magnético estático para sesgar un proceso químico en favor de uno de dos productos simétricos, enantiómeros levo o dextrógiros. La química de la vida es homoquiral: se basa casi exclusivamente en levo-aminoácidos y en dextro-azúcares; la capacidad para discriminar unos y otros enantiómeros resulta esencial para los sistemas vivos. Tanta es la importancia que la quiralidad tiene en la naturaleza que los científicos vienen preguntándose desde hace mucho por su origen.

Comenzó la indagación en 1846, cuando Faraday logró hacer rotar el plano de polarización de un rayo de luz linealmente polarizado mediante un campo magnético paralelo al rayo. Tal descubrimiento revistió importancia fundamental, pues demostraba concluyentemente la íntima relación entre el electromagnetismo y la luz. Fue también causa de confusión para muchos estudiosos, incapaces de apreciar la diferencia entre la rotación óptica inducida magnéticamente por Faraday y la rotación óptica natural descubierta treinta años antes por Arago y Biot en ciertos cristales y fluidos. Dicha actividad óptica se debe a la quiralidad microestructural de los mismos, como Fresnel demostraría posteriormente.

El primero de los desencaminados fue Pasteur, quien separó en 1848 cristales de tartrato sódico-amónico en las variedades dextro y levo, las cuales, en disolución, provocaban de forma natural rotaciones ópticas de igual amplitud y de sentidos opues-

tos. Partiendo de este hito, Pasteur trató de inducir quiralidad en los cristales por acreción en el seno de un campo magnético, al que erróneamente consideraba, según el descubrimiento de Faraday, como fuente de quiralidad. Pero Lord Kelvin, que introdujo el término “quiralidad” en las ciencias, no incurrió en tal error y enunció con total firmeza que “la rotación magnética no tiene cualidad levógira o dextrógira, es decir, carece de quiralidad. Así lo había comprendido perfectamente Faraday y así lo expresó con claridad en sus escritos; pero incluso en nuestros días es frecuente ver clasificadas conjuntamente la rotación quiral y la rotación magnética, contra lo cual advertía cumplidamente Faraday en su descripción primera del descubrimiento de la polarización magnética.” La admonición de Lord Kelvin continuó siendo ignorada en gran medida y en los cien años siguientes pudieron verse muchas otras inútiles tentativas de inducción de quiralidad en procesos químicos mediante campos magnéticos, muchas veces con el mismo propósito que el del experimento de Pasteur, a saber, hallar la fuente de la homoquiralidad de las moléculas de la vida y puede que los orígenes de la vida misma.

La historia tomó un nuevo giro en 1982. Wagnière y Meier pronosticaron que la luz sería absorbida de modo ligeramente distinto por una disolución de moléculas quirales si el haz lumínico viajaba paralelamente a un campo magnético externo, que si lo hacía antiparalelamente al mismo. Esta pequeña diferencia en la absorción es completamente independiente del estado de polarización del haz de luz y debería producirse, pues, con luz no polarizada (*véase la figura*). Tal efecto, más tarde denominado “dicroísmo magnetoquiral”, sería consecuencia de un sutil influjo de los efectos magnéticos y quirales sobre las propiedades ópticas moleculares, siendo observado experimentalmente en 1997 por Rikken y Raupach en el High Magnetic Field Laboratory (Laboratorio de campos magnéticos intensos) de Grenoble.

Los mismos autores se han valido ahora del dicroísmo magnetoquiral para favorecer la producción de uno de los enantiómeros en una reacción fotoquímica. Su experimento utiliza el complejo Cr(III)tris-oxalato, que es inestable en disolución y se reasocia. Por esta razón se observan siempre iguales concentraciones de los enantiómeros levo y dextro en el equilibrio. Esta disociación es acelerada por la absorción de luz. Los autores demuestran que, en presencia de un haz de luz láser no polarizada que viaja paralelamente a un campo magnético estático, se produce y se mantiene un ligero exceso de uno de los enantiómeros, mientras que, al invertir el sentido del campo magnético, resulta una concentración igual del enantiómero simétrico respecto a un plano. Su experimento satisface finalmente lo que Pasteur ambicionaba, aunque de modo más sutil que el concebido por él.

Este trabajo confirma el valor de una nueva definición de quiralidad que se remonta a la original de Lord Kelvin (basada en la simetría respecto a un plano, como la reflexión en un espejo) para incluir la inversión del tiempo, de modo que incluya la quiralidad dependiente del movimiento. Esta definición proporciona un enunciado riguroso de las características fundamentales de simetría que han de poseer las fuerzas y los campos físicos externos para poder producir la enantioselección en todas las circunstancias, incluso en situaciones en que una reacción química haya alcanzado el equilibrio termodinámico. De acuerdo con esta nueva definición, una influencia magnetoquiral posee “quiralidad verdadera” y tiene, en consecuencia, el mismo rango que la luz con polarización circular y que la interacción electrodébil en lo tocante a capacidad para inducir enantioselección absoluta. Estas son, en la actualidad, las explicaciones preferidas de la homoquiralidad de la vida, habiéndose observado ya experimentalmente la fotoquímica enantioselectiva con luz circularmente polarizada.

Tanto por razones experimentales como por consideraciones teóricas es ahora preciso tomar en serio la fotoquímica magnetoquiral al explicar los posibles orígenes de la homoquiralidad biológica.

LAURENCE D. BARRON
Universidad de Glasgow, R.U.

Inducción de una disolución descompensada. Un haz de luz no polarizada atraviesa una disolución de moléculas quirales (representadas mediante pequeñas hélices) dispersas en el seno de un campo magnético que es, ora paralelo, B(⇈), ora antiparalelo B(⇅) a la dirección de propagación. Los coeficientes de absorción ε(⇈) y ε(⇅) son ligeramente diferentes, a causa del dicroísmo magnetoquiral

Transformación de un mosquito

Apesar de los esfuerzos que le han dedicado cientos de profesionales y de muchos decenios de investigación, la malaria sigue siendo una plaga que azota cada año a millones de personas. Ahora se ha aplicado un método que al menos debería permitir una mejor comprensión de la fisiología de los mosquitos que transmiten la enfermedad y de sus relaciones con el microorganismo que la causa.

La mayor parte de las investigaciones realizadas hasta la fecha se han centrado en el parásito y en el hospedador humano, pero aún no se ha conseguido una vacuna viable. La propagación de la resistencia a los insecticidas obstaculiza la actuación directa sobre las poblaciones de mosquitos. Y los intentos de poner coto y tratamiento a la enfermedad suelen acabar frustrados por la aparición de resistencia de los parásitos frente a los fármacos.

Mucho menos se han estudiado los mosquitos transmisores y sus re-

laciones con el parásito. Flaminia Catteruccia y sus colaboradores han desarrollado ahora un sistema de transformación genética de *Anopheles stephensi*, uno de los principales vectores de la malaria en las zonas urbanas del subcontinente índico. Esta técnica se aplicará fundamentalmente a la investigación de los aspectos moleculares de la transmisión del parásito de la malaria, pero pudiera proporcionar también nuevos mecanismos de atajar la enfermedad. La perspectiva más ambiciosa sería la producción de una cepa de mosquito alterada mediante ingeniería genética que fuese incapaz de transmitir el patógeno, reemplazando la población salvaje con esta "cepa inocua".

El proceso de transformación genética de los insectos se realiza mediante pequeñas moléculas circulares de ADN (plásmidos) que son microinyectadas en los huevos de la especie. Los investigadores de este nuevo método han introducido una modificación en el procedimiento de inyección. Conservan los huevos en una solución que contiene un producto químico que retrasa su consolidación, lo cual supone una mejora de la eficacia de la incubación y de la introducción del ADN. Los plásmidos se producen en células bacterianas mediante técnicas de recombinación de ADN y contienen secuencias de ADN móviles, conocidas como trasposones o genes saltadores.

Los trasposones pueden moverse —saltar— de las moléculas de ADN plasmídico e insertarse en zonas al azar de los cromosomas del mosquito. Si esto sucede en el núcleo de una célula germinal (espermatozoide y óvulo), la prole resultante estará genéticamente transformada. Estos fragmentos "saltadores" pueden llevar cierta cantidad de ADN adicional, en este caso un gen marcador, de manera que los individuos transgénicos puedan distinguirse fácilmente de sus hermanos naturales.

Desde hace ya veinte años se viene practicando un sistema de transformación de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*, que ha permitido un amplio abanico de experimentos de biología humana y de entomología. Los sistemas de transformación rutinaria aplicados a otros insectos son mucho más recientes, pero en los últimos dos años su éxito ha aumentado de forma exponencial y se ha conseguido transformar a diez insectos diferentes.

Aunque el así llamado trasposón *P* se utilice habitualmente en la transformación de *D. melanogaster*, es inactivo en varios insectos no drosofiloides. Así que uno de los progresos de la investigación ha sido poder disponer de varios trasposones diferentes para los experimentos de transformación genética de estas especies. Catteruccia y los suyos eligieron el trasposón *Minos*, procedente de *Drosophila hydei*, que ya había sido utilizado para transformar a la mosca mediterránea de la fruta *Ceratitis capitata*.

El gen de los ojos blancos, que "devuelve" el color normal de los ojos a las cepas mutantes que tienen ojos blancos, suele utilizarse como marcador en la transformación de *D. melanogaster*. Pero la mayoría de los insectos no drosofiloides no tienen cepas mutantes, por lo que el gen elegido ha sido el de la proteína fluorescente verde (GFP), que produce luz verde cuando es excitada mediante rayos ultravioletas. En la figura se muestra una imagen digital de las larvas del mosquito transgénico con fluorescencia GFP. Los avances detalladamente expuestos por estos autores deberían permitir que las técnicas de transformación se apliquen pronto al vector principal de la malaria humana, *Anopheles gambiae*. Esta especie es la responsable de la transmisión de la enfermedad en el África subsahariana, donde se produce más del 90 % de los casos de malaria y donde se ha estimado que mueren un millón de personas al año.

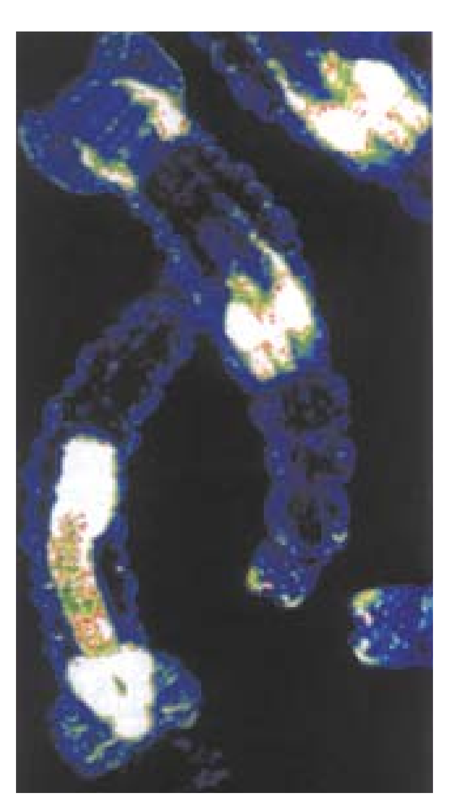


Imagen digital de una larva de mosquito transgénica que expresa el gen marcador de la proteína fluorescente verde. Las zonas negras y las blancas representan respectivamente regiones de expresión baja y de expresión alta

No todas las cepas de una especie vectora pueden transmitir el patógeno; las que no lo hacen reciben el nombre de cepas refractarias. El estudio de las bases moleculares de este fenómeno suministrará moléculas que puedan ser introducidas en una cepa receptora y la conviertan en refractaria. El progreso en la comprensión del sistema inmune de los insectos está proporcionando además posibles genes diana susceptibles de ser transformados en cepas de mosquito para prevenir el desarrollo y la transmisión del parásito. Los investigadores también pueden recurrir a moléculas procedentes del sistema inmune de los vertebrados, como por ejemplo a los anticuerpos. Mediante diversos métodos moleculares es posible clonar los dominios de enlace de los anticuerpos que reconocen a los parásitos de la malaria en forma de pequeños fragmentos de ADN que luego se pueden incorporar al genoma del mosquito.

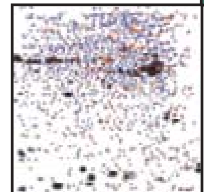
Aunque existe la posibilidad inmediata de confeccionar una cepa refractaria de mosquito, sigue planteada la cuestión de su introducción en la naturaleza. Es poco probable que se pudieran criar en el laboratorio suficientes individuos como para permitir un reemplazo sencillo de la población salvaje, aun suponiendo que la cepa sometida a ingeniería tuviera idénticas posibilidades de supervivencia en condiciones naturales. Pero quizá se pudiera aprovechar la capacidad de los trasposones para propagarse por las poblaciones naturales como fuerza motora para extender la cepa refractaria.

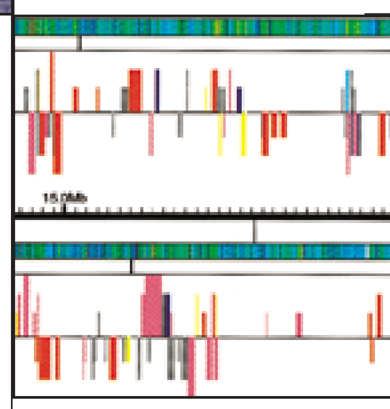
Las consecuencias y los riesgos que lleva asociada la liberación al medio natural de mosquitos transgénicos requerirán de un estudio cuidadoso antes de que pueda convertirse en realidad. Pero, sea cual sea el resultado final, el éxito obtenido en la transformación de un mosquito vector de la malaria humana es un notable adelanto en nuestra capacidad para combatir esta devastadora enfermedad.

CRAIG J. COATES
Universidad de Texas, EE.UU.

LA INDU DEL GENOMA HUMANO







STRIA

Lo que puede significar un decenio. Pasó el tiempo en el que los políticos (y no digamos el público en general) no distinguían los genomas de los gnomos, los diminutos habitantes fantásticos de los bosques según los cuentos. Sirva de ejemplo una historia protagonizada por el presidente George Bush en 1989 y que aún resuena en mi memoria.

En una ceremonia de entrega de las Medallas Nacionales de Ciencia y Técnica, celebrada en la Sala Oriental de la Casa Blanca, Bush expuso con orgullo todo lo que su gobierno y el de su predecesor Reagan habían hecho por la ciencia: la estación espacial, el (ahora difunto) *Supercolisionador superconductor* y la iniciativa del "Gnomo" (en inglés *gnome*) humano. No hizo ademán alguno de rectificar. Nadie pestañeó. No se produjo en la sala ni una sonrisa disimulada ni un murmullo. Los asistentes (burócratas de categoría relacionados con asuntos científicos y dirigentes de las industrias técnicas más avanzadas) ni siquiera intercambiaron gestos de sorpresa. Los premiados (entre los que se encontraban precisamente Stanley N. Cohen y Herbert W. Boyer, inventores de la técnica de corte y empalme génico) subieron al podio con la seriedad propia del acto para estrechar la mano del presidente y aceptar sus felicitaciones.

¿Había oído bien? Era evidente que sí: en la recepción posterior a la entrega de premios toda la sala comentaba el error de Bush y lo interpretaba tristemente como un signo de su ignorancia sobre el Proyecto del Genoma Humano. Pero, para estar segura, cuando volví al despacho llamé a la oficina de prensa de la Casa Blanca para que me proporcionasen una copia del texto que Bush leyó y un acta de lo que dijo. El primero decía claramente "genoma"; en el segundo podía leerse "gnomo". Todo esto sucedía el año en que los Institutos Nacionales de la Salud iban a gastarse 28,2 millones de dólares en las primeras etapas del Proyecto del Genoma Humano.

Este proyecto está básicamente terminado en la actualidad y hay poca gente que pueda decir que nunca ha oído hablar de él. Son muchos quienes han invertido en técnicas relacionadas con el genoma, que se ha convertido rápidamente en una próspera industria generadora de millares de millones de dólares. Con el presente informe especial *Investigación y Ciencia* intenta poner a sus lectores al corriente del estado actual de los conocimientos sobre el genoma humano y presenta dos nuevos campos (la bioinformática y la proteómica) listos para recoger los frutos de su desciframiento.

Esperemos que, después de leer estas páginas, nadie vuelva a confundir el genoma humano con un cursi ornamento de jardín.

—*Carol Ezzell*

EL NEGOCIO ACTUAL DEL GENOMA HUMANO



Las empresas públicas y privadas que han descifrado el código genético humano han tenido que soportar una larga y penosa travesía. Lo bueno comienza ahora

Kathryn Brown

Ya se puede leer todo el código genético de un ser humano en Internet. No es lo que podría considerarse una lectura fácil: de principio a fin no aparecen más que las letras A, T, C y G, repetidas una y otra vez en orden variable y con una longitud suficiente como para llenar más de 200 guías telefónicas. Para los biólogos, sin embargo, es el gran éxito de la temporada. Las letras representan los productos químicos del ADN que integran todos los genes de los seres humanos e influyen en su forma de hablar, de andar, de pensar y de dormir. Francis S. Collins, director del Instituto Nacional de Investigación sobre el Genoma Humano en Bethesda, Maryland, piensa que es como si leyéramos nuestro propio libro de instrucciones. ¿Qué puede haber más interesante?

Collins dirige el Proyecto del Genoma Humano (PGH), que hasta ahora ha gastado 250 millones de dólares para formular por escrito el mapa de todos nuestros genes. El PGH es un consorcio público integrado por cuatro grandes centros de secuenciación de Estados Unidos, por el Centro Sanger, de Cambridge, Inglaterra, y por laboratorios de Japón, Francia, Alemania y China. Trabajando codo a codo durante más de un decenio, unos 1100 investigadores han fabricado a mano un mapa de los tres mil millones de pares de bases, o unidades, del ADN que constituyen el genoma humano. Y no están solos. Una temeraria compañía joven, denominada Celera Genomics, de Rockville, Maryland, propinó un duro golpe al consorcio al anunciar en abril del presente año su propio borrador del genoma humano. La rivalidad ha permitido el esclarecimiento del código genético humano y de lo que los investigadores se proponen hacer con él a partir de ahora.

Durante mucho tiempo prevaleció el concepto erróneo de que, una vez acabada la secuenciación del ADN, se gozaría de una idea clara de quiénes somos, por qué enfermamos y por qué envejecemos. La verdad es que para el esclarecimiento total faltan todavía unos cuantos decenios.

Pero los investigadores pueden imaginar cómo será ese día. Las compañías farmacéuticas, por ejemplo, están reuniendo los conocimientos prácticos sobre genética necesarios para fabricar medicinas a la medida de genes específicos, lo que se conoce como farmacogenómica. Los farmacéuticos del futuro podrán proporcionar a sus clientes una versión de antihipertensor adecuada a su exclusivo perfil genético, distinta para cada uno. Otras empresas ya han conseguido con grandes dificultades realizar análisis sanguíneos que revelan mutaciones indicadoras de enfermedad en ciertos genes y permiten pronosticar la posibilidad de verse afectado por determinadas enfermedades, como la de Huntington. Y hay investigadores que mantienen todavía el optimismo respecto de las terapias génicas, que consisten en la adición directa de genes sanos al organismo del paciente. J. Craig Venter, presidente de Celera, piensa que el conocimiento del genoma cambiará la forma de realizar los ensayos farmacológicos y dará comienzo a una era completamente nueva de medicina individualizada.

Pero, aun disponiendo del código humano, la industria genómica se enfrenta a muchas dificultades. Algunos de ellos son técnicos. Una cosa es conocer una estructura química y otra muy distinta es comprender su función real. Otros son legales. ¿Cuánto hay que saber sobre un gen para patentarlo? Muchos dilemas son sociales. ¿Realmente quiere uno que le diagnostiquen una enfermedad que no tiene tratamiento y que además no le afectará hasta dentro de veinte años? Conforme se empiece a desenmarañar el genoma, puede que todo esto se vaya volviendo cotidiano.

La carrera

Esta primavera todos los ojos estaban puestos en la primera línea acabada del genoma: un borrador de los aproximadamente 100.000 genes que hay en nuestro interior. El método utilizado por el PGH se ha descrito como concienzudo y preciso. Empezando con células sanguíneas y espermáticas, se separaron los 23 pares de cromosomas que albergan los genes humanos. Se cortaron luego fragmentos del ADN de cada cromosoma, se identificó la secuencia de bases del ADN de cada fragmento y, por último, se localizó y se agrupó cada retazo de ADN situado a sus dos lados en el cromosoma. De esta manera artesanal se fueron elaborando



CELERA GENOMICS, cuya planta en Rockville, Maryland, tiene 300 secuenciadores automatizados de ADN (además de una elegante hélice de ADN azul en el techo).

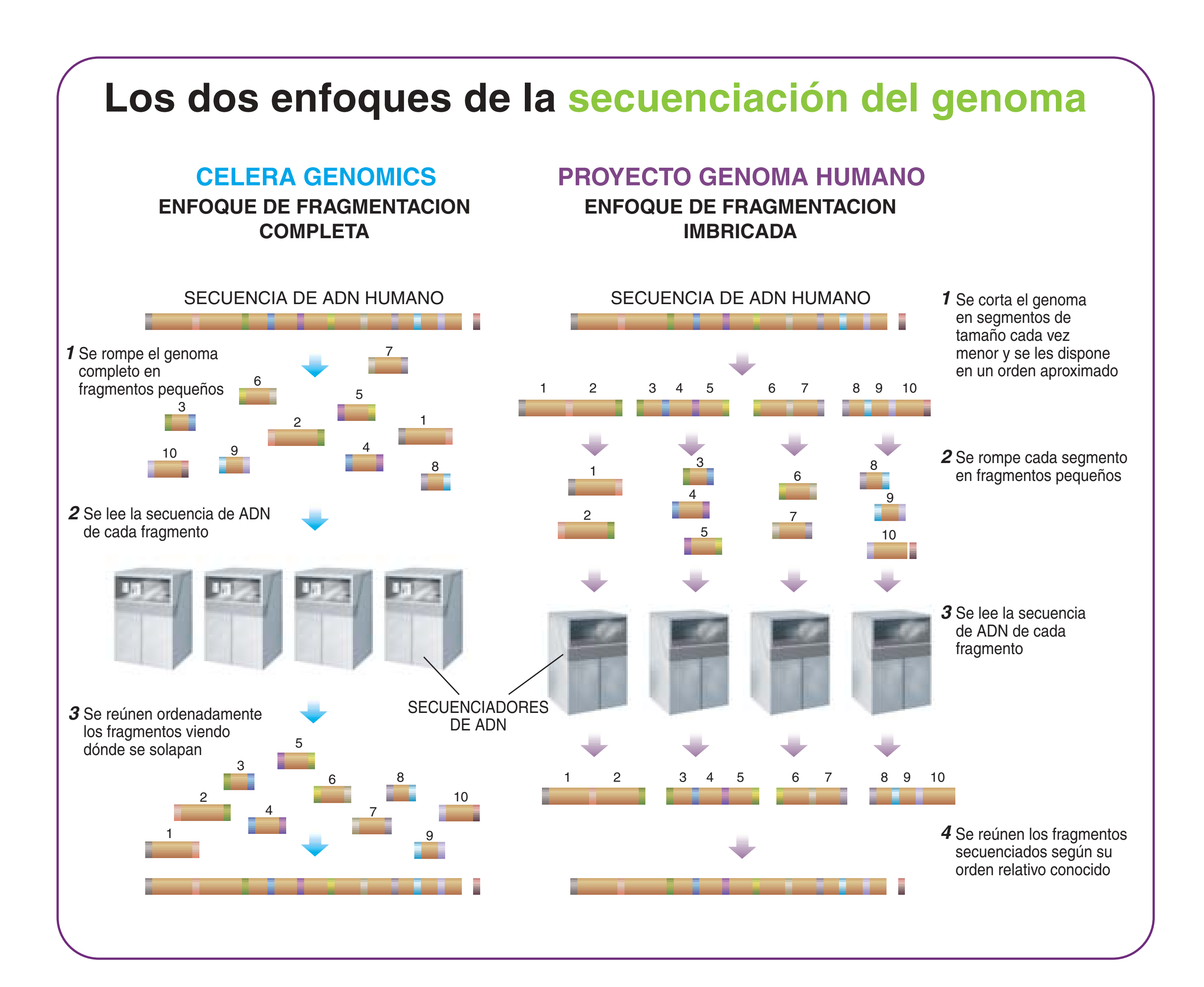
progresivamente las secuencias de segmentos génicos individuales, de genes completos, de cromosomas completos y, por último, del genoma entero. Es como arrancar una a una todas las páginas de una enciclopedia, romperlas y luego volverlas a recomponer.

Celera tomó en cambio un camino más corto: hizo añicos toda la enciclopedia de una vez. Su método de secuenciación consiste en romper de un golpe todos los genes en fragmentos y confiar luego en los ordenadores para reincorporarlos a un genoma completo. El énfasis se pone en la potencia de cómputo, utilizando algoritmos para secuenciar los datos, con las ventajas de la eficacia y la velocidad.

Los conceptos que los equipos del PGH y de Celera tienen sobre lo que sea un "genoma acabado" no coinciden. Cuando Celera anunció que había acabado de secuenciar el borrador del genoma de una persona anónima y que ordenaría los datos en un mapa en tan sólo seis semanas, el grupo público manifestó inmediatamente su indignación. Collins hizo notar que Celera se había quedado corta con respecto a sus propósitos originales de secuenciación del genoma. Los responsables de Celera planearon secuenciar los genomas completos de varias personas, verificando diez veces su genoma "consenso", cuando la compañía comenzó a trabajar en 1988. Celera declaró en abril de este año que la secuenciación preliminar se había realizado por completo con el genoma de una sola persona, secuenciado nada más que tres veces.

Aunque se ha calificado muchas veces al PGH y a Celera como competidores en una carrera, la empresa privada ha gozado de una ventaja incuestionable. Dado que el PGH es un proyecto público, envía de manera rutinaria todos sus datos sobre el genoma al GenBank, una base de datos pública a la que se puede acceder a través de Internet (en www.ncbi.nlm.nih.gov/). Como todos los demás, Celera ha utilizado esos datos; en su caso, para ayudar a verificar y a rellenar las lagunas del borrador del genoma realizado por ella. Celera ha utilizado los datos públicos del genoma para ir un paso por delante en el esfuerzo de secuenciación, cosa que algunos consideran intolerable. Pero hay quienes consideran razonable desde el punto de vista de los negocios el plan revisado de Celera. No se trata únicamente de sentarse y de estar secuenciando el resto de la vida. Celera utilizará su triple análisis para ordenar los datos públicos, lo que se espera proporcione un cuadro muy preciso del genoma humano. El PGH anunció a principios de mayo que había completado su propio borrador de trabajo, así como una secuencia acabada del cromosoma 21, implicado en el síndrome de Down y en muchas otras enfermedades. (En www.sciam.com/explorations/2000/051500chrom21 se puede encontrar una historia completa sobre el cromosoma 21.)

Los elaboradores del genoma se han concentrado hasta ahora en las semejanzas existentes entre todos nosotros. Se cree que el 99,9 por ciento de los genes de todas las personas son exactamente iguales. Pero el 0,1 por ciento restante varía y son estas variaciones lo que más interesa a las compañías farmacéuticas. Incluso un simple polimorfismo de un nucleótido individual (SNP) puede significar un problema (por ejemplo, el he-



cho de que alguien tenga una T donde otra persona tiene una C).

Estas minúsculas variaciones genéticas son la causa de que muchos remedios no produzcan efecto más que entre un 30 y un 50 por ciento de la población humana, en opinión de Venter. Puede llegarse al extremo de que lo que salva la vida de una persona acabe con la de otra. Pone como ejemplo el Rezulin, un medicamento para la diabetes de tipo II, que se ha relacionado con más de 60 fallecimientos en todo el mundo por toxicidad hepática. Cree que en el futuro bastará una simple prueba genética para determinar si es probable que una medicina dada proporcione un tratamiento eficaz o si tendría graves consecuencias. Mientras desarrollaba su borrador del genoma, Celera ha comparado también algunos genes de varios individuos, construyendo una base de datos de polimorfismos de nucleótidos aislados (SNP, “snips”, para los ingleses).

Hay otras compañías que también esperan sacar partido de la farmacogenómica. Los gigantes farmacéuticos están asociándose con empresas especializadas más pequeñas para satisfacer sus sueños génicos. Pfizer de Nueva York se ha asociado con Incyte Genomics, de Palo Alto, California; SmithKline Beecham, de Filadelfia, con Human Genome Sciences, de Rockville; y Eli Lilly, de Indianápolis, con Millennium Pharmaceuticals, de Cambridge, Massachusetts. Aunque la medicina individualizada no haya salido todavía de la mesa del laboratorio, algunos analistas financieros creen que podría convertirse en un mercado de 800 millones de dólares en el año 2005.

Lo que es seguro es que el camino va a estar lleno de baches. Un punto de fricción es el uso de patentes. Nadie pestañea cuando Volvo patenta un nuevo coche o Microsoft un programa informático. Pero hay mucha gente que no acepta que las compañías biotécnicas pretendan tener derechos sobre el ADN humano, la esencia de nuestro ser. Pero sin dichas patentes una compañía como Myriad Genetics, de Salt Lake City, no podría destinar el tiempo ni el dinero necesarios para elaborar pruebas de detección de mutaciones en los genes BRCA1 y BRCA2, relacionados con los cánceres de mama y de ovario.

La mayoría de los investigadores está de acuerdo en este punto, aunque algunos sostengan que las empresas privadas están abusando de los datos públicos del genoma, que se ha secuenciado en condiciones tan rigurosas y en gran parte con dinero público. Al enviar dócilmente sus hallazgos al GenBank, los científicos del PGH han ofrecido al mundo una panorámica sin parangón de lo que constituye un ser humano. Y el personal de Celera no es el único que ha mirado. GenBank contabilizó en abril unos 35.000 visitantes al día. Algunos trabajan en compañías como

Los “otros” genomas

Se ha recurrido a organismos comparativamente sencillos con objeto de encontrar nuevos fármacos útiles para los seres humanos

Julia Karow

¿Qué tenemos en común con moscas, gusanos, levaduras y ratones? No mucho, según parece a simple vista. Pero los investigadores de la empresa privada y los universitarios están utilizando los genomas de esos denominados organismos modelo para estudiar diversas enfermedades humanas, entre ellas el cáncer y la diabetes.

La razón de que los genes de los organismos modelo sean tan atractivos para los cazadores de fármacos es que, en muchos casos, las proteínas que codifican se parecen enormemente a las humanas, mientras que su manipulación en el laboratorio es mucho más fácil. La probabilidad de que un gen humano cualquiera, tomado al azar, tenga un equivalente en los nematodos o la mosca de la fruta lo bastante semejante como para permitir estudiar su función oscila entre el cincuenta y el ochenta por ciento.

He aquí un resumen del estado de los proyectos de genoma de los principales organismos modelo en la actualidad:

La mosca de la fruta

La secuencia del genoma de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* se completó este pasado mes de marzo gracias a la colaboración entre investigadores de empresas públicas y científicos de Celera Genomics en Rockville, Maryland. Descubrieron que el 60 por ciento de los 289 genes de enfermedades humanas conocidos tienen su equivalente en las moscas y que unas 7000 (50 por ciento) de todas las proteínas de la mosca muestran semejanzas con las proteínas de mamífero conocidas.



Uno de los genes de la mosca con un equivalente humano es el *p53*, un gen denominado supresor tumoral que, cuando muta, permite que la célula se vuelva cancerosa. El gen *p53* forma parte de una vía molecular que induce al suicidio a las células que han sufrido un daño genético irreparable. Varios investigadores, entre ellos los de Exelixis, en el sur de San Francisco, identificaron en marzo la versión del *p53* de la mosca y encontraron que, exactamente igual que sucede con las células humanas, las de la mosca en las que se inactiva la proteína P53 pierden la capacidad de autodestruirse después de sufrir un daño genético, pasando a crecer sin tasa. Semejanzas como ésta hacen de la mosca un buen modelo para estudiar los acontecimientos moleculares que subyacen al cáncer humano, según uno de los directores del proyecto genoma de la mosca, Gerald M. Rubin, del Instituto Médico Howard Hughes, de la Universidad de Carolina, de Berkeley.



Los gusanos

Cuando se descifró la secuencia genómica completa del nematodo *Caenorhabditis elegans* en 1998 se encontró que aproximadamente una tercera parte de las proteínas del gusano (más de 6000) son similares a las de los mamíferos. Son varias las compañías que aprovechan actualmente el diminuto tamaño de los nematodos (alrededor de un milímetro), utilizándolos en pruebas de detección automatizadas para la búsqueda de nuevos medicamentos.

Para llevarlas a cabo se colocan de uno a diez de estos gusanos microscópicos en los pocillos de una placa de microtitulación de plástico. Cuando se buscan medicamentos que contrarresten la diabetes se utilizan gusanos con una mutación en el gen que codifica para el receptor de la insulina que les obliga a detener su crecimiento. Añadiendo diversos productos químicos a los pocillos se puede determinar cuál de ellos restaura el crecimiento de los gusanos, una indicación de que el producto ha sorteado el receptor defectuoso. Dado que las células de muchas personas diabéticas no responden ya a la insulina, estos productos pudieran servir de base para nuevos tratamientos de la diabetes.



Las levaduras

La humilde levadura del pan, *Saccharomyces cerevisiae*, fue el primer organismo con núcleo del que se leyeron los secretos genéticos, cosa que sucedió en 1996. Aproximadamente 2300 (38 por ciento) de todas las proteínas de la levadura son similares a proteínas conocidas de los mamíferos, lo que hace de aquéllas un organismo modelo particularmente bueno para estudiar el cáncer: en estos diminutos hongos se descubrieron los mecanismos fundamentales que las células utilizan para regular su división.

Uno de los resultados de estas investigaciones es el cisplatino, un quimioterápico común, que mata de manera particularmente eficaz a las células cancerosas que tengan un defecto específico en su capacidad de reparación del ADN.

El ratón

Todos estos organismos modelo son muy valiosos, pero todos los medicamentos nuevos tienen que probarse en última instancia en mamíferos, lo que a menudo significa ratones. Los ratones están muy próximos a los seres humanos en lo que a su genoma se refiere: más del 90 por ciento de las proteínas de ratón identificadas hasta ahora muestran semejanzas con las proteínas humanas conocidas. Diez laboratorios de todo Estados Unidos, conocidos como la Red de secuenciación del genoma de ratón, recibieron colectivamente 21 millones de dólares de los Institutos Nacionales de la Salud el año pasado para que secuenciaran el genoma de ratón. Han completado aproximadamente un 3 por ciento de la tarea y su objetivo es tener listo un borrador para 2003, aunque Celera anunció en abril que está dedicando también su considerable potencia de secuenciación a esta tarea.



LOS PRINCIPALES ACTORES

Celera Genomics

División de PE Corp.

www.celera.com

Símbolo: CRA
Sede central: Rockville, Maryland
Jefe máximo: J. Craig Venter, presidente
Principales clientes/socios: Pfizer, Pharmacia, Novartis, Amgen y Takeda Chemical Industries
Estrategia: Venta de suscripciones teleinformáticas a diversos genomas comentados.
Financiación anual: 900 millones de dólares
Propósito fundamental: negocios en torno a bases de datos genómicos
Ventajas competitivas: amplia infraestructura de secuenciación del ADN y abundantes recursos financieros

Human Genome Sciences

www.hgsi.com

Símbolo: HGSI
Sede central: Rockville, Maryland
Jefe máximo: William A. Haseltine, director y CEO
Principales clientes/socios: SmithKline Beecham, Takeda Chemical Industries, Schering-Plough, Sanofi-Synthelabo y Merck
Estrategias: desarrollo y comercialización de fármacos basados en la genómica; suministro de dianas farmacológicas a sus clientes
Financiación anual: 525 millones de dólares
Propósito fundamental: comercializar medicamentos basados en el genoma
Ventajas competitivas: patentes registradas de más de 7500 genes humanos; tres fármacos genómicos en ensayos clínicos humanos

Incyte Genomics

www.incyte.com

Símbolo: INCY
Sede central: Palo Alto, California
Jefe máximo: Roy A. Whitfield, CEO
Principales clientes/socios: 18 de las principales 20 compañías farmacéuticas
Estrategia: proporcionar acceso comercial no exclusivo a las bases de datos genómicas y vender el acceso a los clones de ADN en ellas representados
Financiación este año: 622 millones
Propósito fundamental: convertir la información genómica en un negocio duradero
Ventaja competitiva: un amplio conjunto de datos, que abarca secuencias génicas, modelos de expresión génica y proteica y variaciones genéticas entre individuos

Millennium Pharmaceuticals

www.mlnm.com

Símbolo: MLNM
Sede central: Cambridge, Massachusetts
Jefe máximo: Mark. L. Jevin, CEO
Principales clientes/socios: Bayer, Pharmacia, Pfizer y Eli Lilly
Estrategias: desarrollo de pruebas terapéuticas y médicas personalizadas; asociación con empresas dedicadas a las técnicas biológicas y farmacológicas en el campo de la farmacogenómica
Financiación anual: 700 millones de dólares
Propósito fundamental: traducir la información genómica en productos patentados, como son los medicamentos y las pruebas analíticas
Ventajas competitivas: Alianzas ya establecidas con fabricantes de fármacos; recientemente adquirió LeukoSite

The Human Genome Project

www.nhgri.nih.gov/HGP/

Sede central: Instituto Nacional de Investigación sobre el Genoma Humano (NHGRI), Bethesda, Maryland
Colaboradores: NHGRI, Departamento de Energía (DOE) y Wellcome Trust
Directores principales: Francis S. Collins, NHGRI; Ari Patrinos, DOE, y Michael Morgan, Wellcome Trust
Principales centros de secuenciación: Facultad de medicina de la Universidad de Washington, St. Louis; Facultad de medicina Baylor, Houston; Centro Sanger, Cambridge, Inglaterra; Instituto Whitehead, Cambridge, Massachusetts; Instituto Joint Genome DOE, Walnut Creek, California
Estrategia: cartografiar, secuenciar y comentar el genoma humano
Financiación anual: 112,5 millones de dólares en 260 subvenciones
Propósito fundamental: comprender la función génica; fomentar leyes que prohíban la discriminación genética; enseñar a los médicos a utilizar la información del genoma
Ventajas competitivas: datos disponibles a las 24 horas de la secuenciación, sin coste y sin restricciones, vía GenBank. También provisión de fondos para estudios sobre las implicaciones éticas, legales y sociales de la genómica

Incyte, que aprovecha los datos públicos para elaborar su propio y creciente catálogo de genes, patentando luego los posibles usos de esos genes. Incyte ha conseguido ya 500 patentes por lo menos de genes completos (más que cualquier otra compañía del sector) y la ha solicitado para otros 7000 aproximadamente. Hay investigadores que deploran que estas compañías estén patentando genes que apenas entienden y que, al hacerlo, estén restringiendo la investigación futura sobre ellos, ya que, si los datos están bajo llave en una base de datos privada y sólo unos pocos privilegiados pueden tener acceso a ellos por subscripción, se retardará el descubrimiento sobre muchas enfermedades.

Pero el presidente de Incyte, Randal W. Scott, ve las cosas de modo diferente. Según él, el propósito real del Proyecto Genoma Humano es acelerar los descubrimientos científicos; los trabajos posteriores son su culminación natural. Y cree que se está progresando a un ritmo superior a lo que muchos habían soñado. Incyte lanzó en marzo un programa de comercio electrónico genómico (como un amazon.com para genes), que permite a los investigadores pedir datos sobre la secuencia, o copias físicas, de más de 100.000 genes a través del correo electrónico. Entre los subscriptores a la base de datos genómica de la compañía se cuentan gigantes farmacéuticos como Pfizer, Bayer y Eli Lilly. Human Genome Sciences ha conseguido más de 100 patentes génicas (y ha solicitado aproximadamente otras 7000) mientras elabora su propia y colosal colección de genes, que será aprovechada por sus socios farmacéuticos, entre ellos SmithKline Beecham y Schering-Plough.

El gobierno estadounidense ha venido a complicar el debate de las patentes. El presidente Bill Clinton y el primer ministro británico Tony Blair lanzaron en marzo un mensaje ambiguo, en el que se elogiaba el acceso libre a los datos génicos no elaborados, comentario que algunos analistas interpretaron como un golpe a Celera y a otras empresas que han guardado celosamente sus secuencias del genoma. Celera y el consorcio del PGH mantienen disputas sobre la publicación de los datos, abandonándose las conversaciones de colaboración iniciales cuando la primera se negó a hacer públicas de inmediato y del completo dominio general sus secuencias génicas. La noche en que Clinton y Blair lanzaron su anuncio la cotización de las acciones biotécnicas descendió, perdiendo alrededor del 20 por ciento. Unas cuantas empresas se apresuraron a dar conferencias de prensa y a hacer declaraciones manifestando que, de hecho, ellas proporcionaban gratis sus datos no elaborados sobre el genoma. Durante las semanas siguientes los funcionarios estadounidenses aclararon que el gobierno estaba a favor de las patentes sobre "nuevos productos sanitarios basados en los genes".

La travesía del desierto de la mayoría de buscadores de patentes será la demostración de la utilidad de sus secuencias de ADN. Muchas solicitudes de patente dependen de las técnicas de predicción informática a las que se suele hacer referencia con la expresión "biología *in silico*". Armados con una secuencia génica completa o parcial, los investigadores introducen los datos en un programa de ordenador que predice la secuencia de aminoácidos de la proteína resultante. La comparación de esta proteína hipotética con las proteínas conocidas permite hacer una conjetura aproximada sobre la actividad de la secuencia génica subyacente y sobre cuál pueda ser su utilidad para el desarrollo de un remedio o de una prueba diagnóstica. Puede que esto parezca una forma muy superficial de trabajar, pero suele bastar para conseguir una patente. La última versión de las normas estadounidenses sobre patentes génicas (que en general han levantado un poco el listón con respecto a las exigencias de utilidad) lo único que requiere es que los investigadores tengan una idea razonable de para qué pueda servir el gen recién descubierto.

Pruebas y más pruebas

Las patentes han inducido la comercialización o el desarrollo de más de 740 pruebas genéticas, según los Institutos Nacionales de la Salud. Estas pruebas, sin embargo, muestran lo lejos que aún tiene que llegar la genética. Varios años después de comenzar los ensayos sobre el BRCA1 y el BRCA2, por ejemplo, todavía se sigue intentando determinar con precisión en qué medida tales genes contribuyan al riesgo de cáncer femenino. Incluso las mejores pruebas genéticas plantean múltiples cuestiones. En el caso de la enfermedad de Huntington, se ha desarrollado una que informa con precisión sobre cómo cambia el gen, pero no puede predecirse la edad a la que empezarán los síntomas, la gravedad de la enfermedad ni su ritmo de progreso.

Y hay que tener en cuenta las consideraciones sociales. En la mayoría de las naciones civilizadas ya hay un conjunto confuso de leyes que prohíben que las compañías de seguros y los empresarios puedan actuar discriminadamente contra las personas a partir de la información genética disponible, pero los defensores de la intimidad siguen presionando con vistas a mayores garantías jurídicas.

Mientras tanto Celera pregona su genoma humano, completado con "chuletas" sobre todos los genes, que proporciona por vía teleinformática a sus suscriptores de todo el mundo. ¿Cuáles son los 300 primeros genes relacionados con la hipertensión? ¿Qué hace exactamente cada uno de ellos? Esta es la clase de preguntas que los suscriptores de Celera podrían plantearle, pagando por la respuesta, aunque existe la posibilidad de echar un vistazo gratis a los datos brutos del genoma en Internet.

Pueden hacerse consultas gratis en GenBank. El sobreprecio tendrá que venir justificado por los sistemas de consulta y la información complementaria que se suministre.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ARE SEQUENCERS READY TO ANNOTATE THE HUMAN GENOME? E. Pennisi en *Science*, vol. 287, n.º 5461, página 2183; 24 de marzo, 2000.

THE HUMAN GENOME PROJECT AND ITS IMPACT ON THE STUDY OF HUMAN DISEASE. E. Green en *Metabolic and Molecular Bases of Inherited Disease*. Charles R. Scriver. Octava edición. McGraw-Hill, 2000.

En GeneTests, www.genetests.org se puede encontrar información y un directorio sobre las pruebas genéticas.

Se dispone de más información sobre las implicaciones éticas, legales y sociales de la investigación sobre el genoma humano en la página del National Human Genome Research Institute en www.nhgri.nih.gov/ELSI.

LA FIEBRE BIOINFORMATICA

Ken Howard

La elaboración de los datos en bruto del genoma se ha convertido ya en una industria floreciente

"Plásticos". Cuando un amigo de la familia susurraba esta palabra al personaje de Dustin Hoffman en la película *El graduado* en 1967 no sólo abogaba por el estudio de una nueva carrera, sino por una forma de vida completamente diferente. Si esa película se hiciera hoy, en la época del desciframiento del genoma humano, la palabra mágica bien pudiera ser "bioinformática".

Investigadores públicos y privados han compilado ya los tres gigabytes de pares de A, C, T y G que componen el código genético humano, una cantidad de información que podría ocupar más de 2000 discos normales de ordenador. Pero esto no constituye más que un anticipo de la avalancha de información que se derivará del genoma humano. Se están compilando bases de datos gigantescas que contienen los detalles de las circunstancias de tiempo y lugar en que se activan los diversos genes, las formas de las proteínas que especifican, la forma en que influyen unas proteínas sobre otras y el papel que tales influjos puedan tener en las enfermedades. Si a esto se añade el torrente de datos sobre los genomas de los denominados organismos modelo, como la mosca de la fruta y los ratones, se tendrá lo que Gene Myers, Jr., vicepresidente de investigación informática de Celera Genomics, llama "un maremoto de información". La nueva disciplina de la bioinformática (la unión entre informática y biología) busca encontrar sentido a todo ello. Al hacerlo así, está destinada a cambiar el aspecto de la biomedicina.

La cantidad de información que se obtendrá en los dos próximos años será fenomenal y abrumadora. En lo que se afanarán de forma distinta unos y otros será en la forma de explotarla.

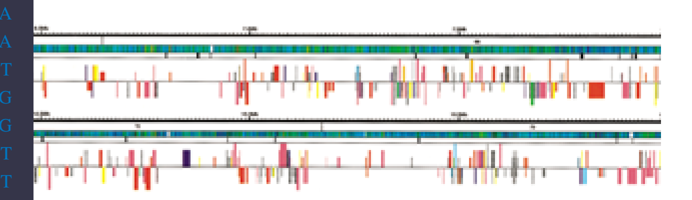
Ya hay muchas empresas puestas a ello. El banco de inversión Oscar Gruss & Son, de la ciudad de Nueva York, ha calculado que la bioinformática podría ser un negocio que reportara dos mil millones de dólares en cinco años. Esta estimación se basa en datos recogidos de más de cincuenta empresas públicas y privadas que ofrecen productos y servicios de bioinformática. Su esfuerzo se concentra en la recogida y el almacenamiento de datos y en la búsqueda y la interpretación de los datos de las bases. La mayoría vende sus servicios a las compañías farmacéuticas y de ingeniería biológica por precios de suscripción millonarios.

La razón de que las compañías farmacéuticas estén tan dispuestas a ponerse a la cola y a pagar por tales servicios (o a montar los suyos propios, con importantes inversiones) es que la bioinformática ofrece la perspectiva de encontrar mejores dianas farmacológicas en fases más tempranas del proceso de desarrollo de los medicamentos. Esta eficacia pudiera reducir el número de remedios potenciales que tuviesen que pasar por la criba de los ensayos clínicos, reduciendo de manera significativa los costes generales. Beneficios adicionales obtendrían las empresas farmacéuticas si se redujeran así los tiempos de investigación y de desarrollo de los fármacos, alargando su vida comercial antes de que expiren las patentes.

Pero antes de que los beneficios económicos empiecen a caer del cielo, las compañías bioinformáticas tienen que habérselas con la actual plétora de datos genómicos y que mejorar constantemente sus técnicas, sus enfoques de investigación y sus prácticas comerciales. La auténtica ocasión y las dificultades de verdad se encuentran en el descubrimiento de cómo se relacionan entre sí los fragmentos de información y en la interpretación del conjunto resultante.

La bioinformática inició su andadura a principios de los años ochenta del siglo XX con una base de datos denominada GenBank, creada por el Departamento estadounidense de Energía para guardar los cortos tramos de secuencia de ADN que se estaban empezando a obtener de una serie de organismos. En los comienzos del GenBank un puñado de técnicos sentados ante teclados que no tenían más que las cuatro letras A, C, T y G tecleaban monótonamente las secuencias del ADN publicadas en las revistas académicas. Conforme pasaron los años, nuevos métodos de comunicación permitieron a los investigadores acceder directamente al GenBank y descargar sus datos de secuencia. La administración del GenBank se transfirió luego al Centro Nacional para información sobre técnicas biológicas (NCBI) de los Institutos Nacionales de la Salud estadounidenses. Con la llegada de la gran telaraña mundial (World Wide Web), los investigadores de todo el mundo pudieron acceder gratis a los datos del GenBank.

El volumen de datos de secuencias de ADN del GenBank empezó a crecer de manera exponencial cuando el Proyecto del Genoma Humano (PGH) despegó en 1990. La introducción de secuenciadores de gran rendimiento en los años noventa (utilizando má-



quinas robóticas automatizadas de secuenciación del ADN y ordenadores) disparó las aportaciones a GenBank, que ahora tiene unos siete mil millones de unidades de ADN de datos de secuencia.

Las empresas privadas iniciaron proyectos paralelos de secuenciación por la misma época, estableciendo por su cuenta enormes bases de datos patentadas. Las hay con capacidad para determinar la secuencia de unos 20 millones de pares de bases en un solo día. Celera Genomics (la central inagotable de secuenciación que anunció en abril que había completado un borrador del genoma humano) dice tener almacenados 50 terabytes de datos. Esto equivale a aproximadamente 80.000 discos compactos, que en sus cajas de plástico ocuparían casi 800 metros de espacio en una estantería.

Pero GenBank y sus primos no son más que una parte del cuadro bioinformático. Otras bases de datos públicas y privadas contienen información sobre la expresión génica (el cuándo y el dónde de la activación de los genes), sobre las minúsculas diferencias genéticas entre individuos denominadas polimorfismos de nucleótidos individuales (SNP), sobre las estructuras de las diversas proteínas y los mapas de sus interrelaciones.

Mezcla y emparejamiento

Una de las operaciones bioinformáticas más elementales consiste en la búsqueda de semejanzas, u homologías, entre un fragmento de ADN recién secuenciado y los segmentos ya disponibles de diversos organismos. El hallazgo de emparejamientos aproximados permite predecir el tipo de proteína que especificará tal secuencia. Esto no sólo proporciona pistas sobre dianas farmacológicas prometedoras en las etapas iniciales del desarrollo de los medicamentos, sino que también suprime algunas que constituirían callejones sin salida.

Una serie popular de programas para comparar las secuencias del ADN es el BLAST (de Basic Local Alignment Search Tool), que apareció por primera vez en 1990. BLAST forma parte de un conjunto de instrumentos de investigación de secuencia de ADN y de proteínas que está disponible en varias versiones, ofrecidas por muchos proveedores de bases de datos o directamente a través del NCBI. Este último ofrece también Entrez, un instrumento de los llamados de metabúsqueda, que cubre la mayoría de las bases de datos del NCBI, entre ellas las que albergan las estructuras tridimensionales de las proteínas, los genomas completos de otros organismos y las referencias a revistas científicas que salvaguardan las entradas de la base de datos.

Un primer ejemplo de la utilidad de la bioinformática es la catepsina K, una enzima que podría resultar importante para el tratamiento de la osteoporosis, enfermedad incapacitante causada por la rotura de los huesos. Los investigadores de SmithKline Beecham pidieron a Human Genome Sciences en 1993 que les ayudaran a analizar ciertos materiales genéticos obtenidos de los osteoclastos de personas con tumores óseos.

LOS DATOS GENETICOS son la esencia de la bioinformática, cuyo cometido puede compararse con la conocida búsqueda de una aguja en un pajar. A modo de ejemplo, en la izquierda, la aguja es la palabra "DOG", enterrada en una secuencia de millares de letras A, C, T y G, las cuatro unidades que constituyen el ADN. Pero la bioinformática también interviene en la comparación de los genes de diversos organismos: las otras ilustraciones de esta página y de la precedente son mapas de los cromosomas de la mosca de la fruta, junto con códigos de barras que muestran las regiones en las que los genes de la mosca son similares a los de otras especies.

LOS PRINCIPALES ACTORES

Lion Bioscience

www.lionbioscience.com

Compañía privada
Sede central: Heidelberg, Alemania
Jefe máximo: Friedrich von Bohlen, CEO
Principales clientes/socios: Bayer, Aventis, Pharmacia
Estrategia: Proporcionar sistemas y servicios bioinformáticos al mundo empresarial
Financiación anual: ninguna
Propósito principal: seguir consiguiendo clientes farmacéuticos y de ingeniería biológica de tamaño medio o grande; repetir el éxito con Bayer
Ventaja competitiva: el contrato de 100 millones de euros con Bayer le ha proporcionado muchos recursos y fama

InforMax

www.informaxin.com

Compañía privada
Sede central: Bethesda, Maryland
Jefe máximo: Alex Titomirov, CEO
Principales clientes/socios: sus productos los utiliza una veintena de compañías farmacéuticas
Estrategia: proporcionar instrumentos de bioinformática de sobremesa al mundo empresarial
Financiación anual: ninguna
Propósito fundamental: ampliación del negocio a los grupos de empresas
Ventaja competitiva: Gran penetración en el mercado de productos de sobremesa

Oxford Molecular Group

www.oxmol.co.uk

Símbolo comercial: OMG (Londres)
Sede central: Oxford, Inglaterra
Jefe máximo: N. Douglas Brown, presidente
Principales clientes/socios: Novartis, Glaxo Wellcome, Merck, Pfizer, Smith-Kline Beecham, Abbott Laboratories
Estrategia: amplio abanico de programas y de servicios de investigación para la creación de medicamentos
Financiación anual: ninguna
Propósito fundamental: expandir el negocio de los productos y servicios para las empresas
Ventaja competitiva: Es propietaria del grupo Genetics Computer Group, cuyo producto insignia, el Paquete Wisconsin, se considera el modelo de análisis de secuencia

NetGenics

www.netgenics.com

Compañía privada
Sede central: Cleveland, Ohio
Jefe máximo: Manuel J. Glynias, presidente y CEO
Principales clientes/socios: Abbott Laboratories, Aventis, IBM
Estrategia: proporciona sistemas y servicios de bioinformática a las empresas
Financiación anual: 21,3 millones de dólares
Propósito fundamental: continuar la penetración entre los clientes farmacéuticos y de ingeniería biológica de tamaño medio y grande
Ventajas competitivas: buena capitalización y buenas relaciones con las grandes compañías farmacéuticas

DoubleTwist

www.doubletwist.com

Compañía privada
Sede central: Oakland, California
Jefe máximo: John Couch, presidente y CEO
Principales clientes/socios: Derwent Information, Clontech Laboratories, Myriad Genetics, AlphaGene, Universidad de Pennsylvania
Estrategia: proporcionar acceso en línea a diversos instrumentos y bases de datos bioinformáticos
Financiación anual: 37 millones de dólares
Propósito fundamental: patentar programas exclusivos y atraer a suficientes clientes; basar el negocio en un portal de Internet
Ventaja competitiva: es muy conocida y tiene un mercado potencial grande

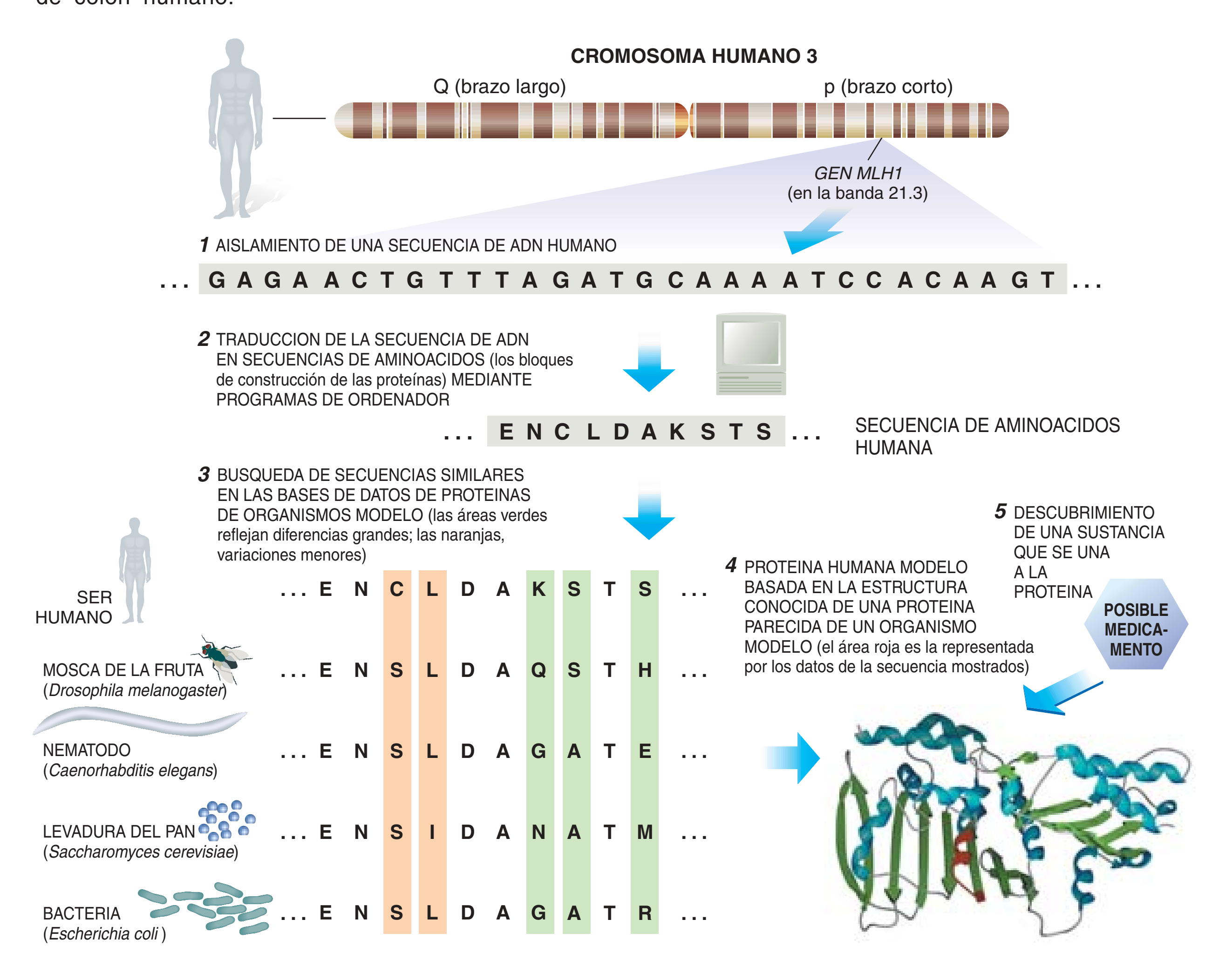
Compugen

www.cgen.com

Privada
Sede central: Tel Aviv, Israel
Jefe máximo: Mor Amitai, CEO
Principales clientes/socios: Merck, Incyte Genomics, Amgen, Millennium Pharmaceuticals, Bayer, Human Genome Sciences, Janssen Pharmaceutica
Estrategia: producción de equipos y programas informáticos para acelerar los algoritmos bioinformáticos; trabajo en el descubrimiento génico y el desarrollo de fármacos; ofrece instrumentos bioinformáticos a través de un portal de Internet
Financiación anual: ninguna
Propósito fundamental: desarrollar un modelo comercial de descubrimiento de fármacos; expandir las líneas de producto; basar las prácticas comerciales en Internet
Ventajas competitivas: fue una de las primeras empresas que desarrollaron programas bioinformáticos especializados, lo que le proporciona experiencia en la extracción de datos. Tiene un remanente de datos biológicos patentados que puede utilizar en el desarrollo de dianas farmacológicas

Utilización de la bioinformática para encontrar dianas farmacológicas

Se buscan genes de los organismos modelo que sean similares a un gen humano determinado. Se obtiene así información sobre la proteína especificada por el gen humano y pueden buscarse productos que la bloqueen. En este ejemplo se utiliza el gen *MLH1*, que se asocia con el cáncer de colón humano.



(Los osteoclastos son células que descomponen el hueso en el curso normal de la renovación ósea; se cree que su actividad es excesiva en los individuos afectados de osteoporosis.)

Human Genome Sciences secuenció la muestra y realizó búsquedas de homología en las bases de datos para encontrar emparejamientos que dieran pistas sobre las proteínas determinadas por las secuencias génicas obtenidas. Luego se procedió a análisis ulteriores y se descubrió que los osteoclastos expresaban con exceso una secuencia concreta, que coincidía con la de una clase de moléculas ya conocidas: las catepsinas.

Este ejercicio de bioinformática le proporcionó a SmithKline en unas cuantas semanas un candidato farmacológico prometedor, que los experimentos estándar de laboratorio no hubiesen encontrado sin años de trabajo y una pizca de suerte. Sus investigadores están intentando ahora encontrar un posible fármaco que bloquee la diana catepsina K. La búsqueda de productos que se unan a las dianas farmacológicas y que tengan el efecto deseado sobre ellas sigue realizándose fundamentalmente en un laboratorio "húmedo" tradicional, donde las pruebas para la determinación de la actividad, la toxicidad y la absorción pueden durar años. Pero hay quienes opinan que también este aspecto del desarrollo farmacológico pasará a los ordenadores, en lo que denominan la biología *in silico*, gracias a las nuevas herramientas bioinformáticas y a las crecientes cantidades de datos sobre las estructuras proteicas y las vías biomoleculares.

Todo lo anterior permite predecir un futuro venturoso para la bioinformática, que, en opinión de mu-

Adiós al *in vitro*: ahora es *in silico*

Con el genoma humano esencialmente completo, los futurólogos intuyen que pronto se podrá utilizar la bioinformática para representar esquemáticamente el astronómico número de reacciones bioquímicas que, en definitiva, viene a ser una vida humana. Ken Howard comenta la posibilidad de esa biología "in silico" con el especialista en complejidad Stuart A. Kauffman, profesor externo del Instituto Santa Fe de Nuevo México, que es también fundador y director científico de la empresa Bios Group de Santa Fe.

P. ¿Qué promesas encierran la bioinformática y la biología "in silico"?

R. pueden considerarse los 100.000 genes de la célula humana como cierta clase de ordenador químico de procesamiento en paralelo, en el que los genes estuviesen continuamente activándose y desactivándose unos a otros en una red enormemente compleja de interacciones. Las vías de señalización de la célula están vinculadas con las vías reguladoras genéticas de formas que sólo estamos empezando a desenmarañar. El mayor proyecto bioinformático que tenemos ante nosotros es descifrar esta red reguladora, que controla el desarrollo celular desde el huevo fertilizado hasta el adulto.

P. ¿Cuál será la recompensa?

R. Sabremos qué gen perturbar (o qué series de genes perturbar y en qué orden) para reconducir a una célula cancerosa hacia un comportamiento no maligno o a la apoptosis [muerte celular programada]. También podría guiarse la regeneración de algunos tejidos, de modo que si, por accidente, alguien perdiera la mitad del páncreas, se fuese capaz de regenerarlo. Se podrían regenerar las células beta de las personas que tienen diabetes.

P. ¿Qué tiene que pasar para que se consigan estos objetivos?

R. No va a ser una mera cuestión de bioinformática, requiriéndose aportaciones de nuevas técnicas matemáticas que propongan circuitos alternativos plausibles para funcionar como fragmentos y piezas de la red reguladora [de la célula]. Luego habría que añadir a esto nuevas clases de experimentos que descubrieran los circuitos celulares reales. Y la bioinformática tendría que ampliarse para que incluya el proyecto de experimentos. El resultado de estas diversas piezas bioinformáticas será la hipótesis que debe ser probada.

P. ¿Qué dificultades se plantean para ello?

R. Supongamos que se obtienen 10 genes que se regulan entre sí y se intenta relacionarlos de un modo que explique su comportamiento. Es algo perfectamente claro y debe hacerse. Pero el problema es que a esos diez genes les llega información de otros genes externos al circuito, que forma parte de otro mucho mayor, que contiene millares de genes. Se está intentando descubrir el comportamiento de ese circuito parcial sin conocer los genes externos que actúan sobre él. Y esto dificulta el enfoque directo, porque nunca se sabe cuáles sean las otras entradas. Hace años que se conoce la individualidad de cada una de las neuronas del gan-

chos, alberga las verdaderas promesas de la genómica y constituye el inicio de un período revolucionario.

En la revolución participan muchos actores diferentes, cada uno con su método. Hay empresas que atienden a los grandes clientes; sus productos y servicios genómicos y de ingeniería biológica se dirigen a las compañías farmacéuticas, para las que elaboran programas a medida y a las que ofrecen servicios de asesoría. Lino Biosciences, con sede en Heidelberg, Alemania, ha tenido un éxito destacado vendiendo programas y servicios bioinformáticos a todo lo largo y ancho del mundo empresarial. Su contrato de 100 millones de euros con Bayer para el montaje y la operación de una red informática dedicada específicamente a la biología en todas las divisiones de Bayer constituye el de mayor importancia en el mundo hasta el momento.

Otras empresas atienden a los clientes pequeños o a los universitarios. Empresas como DoubleTwist y eBioinformatics ofrecen sus productos conjuntamente a través de Internet. Estos portales directos permiten el acceso a varios tipos de bases de datos y la utilización de programas para manipularlos.

DoubleTwist anunció en mayo que había estado utilizando sus recursos para determinar el número de genes del genoma humano. Los cifraban en unos 105.000, aunque puede que el recuento final se encuentre en torno a los 100.000. Informax, Oxford Molecular Group y otras empresas parecidas ofrecen programas empaquetados para quienes prefieran tenerlos a seguro en sus propios ordenadores.

Relaciones

Las grandes compañías farmacéuticas han intentado también rentabilizar sus esfuerzos genómicos con inversiones directas en bioinformática. Son varias las que han establecido departamentos enteros de integración y de servicio para facilitar el acceso a las bases de datos de múltiples departamentos, entre ellos los de desarrollo de nuevos productos, los de formulación y los de toxicología y ensayos clínicos. El antiguo modelo para la creación de nuevos medicamentos separaba esas funciones, lo que dificultaba la utilización conjunta de los datos obtenidos. La bioinformática permite que todos los investigadores de una empresa vean los mismos datos, aunque cada uno los manipule individualmente.

Además de contribuir a la eficacia, el disponer de recursos bioinformáticos propios puede resultar más económico. Glaxo Wellcome está sustituyendo los paquetes individuales utilizados por los diversos departamentos por una plataforma informática única de acceso y manipulación de las bases de datos, calculando que esto le supondrá un ahorro de unos 800.000 dólares durante un período de tres a cinco años.

Para integrar la bioinformática en sus compañías, los gigantes farmacéuticos forjan también alianzas es-

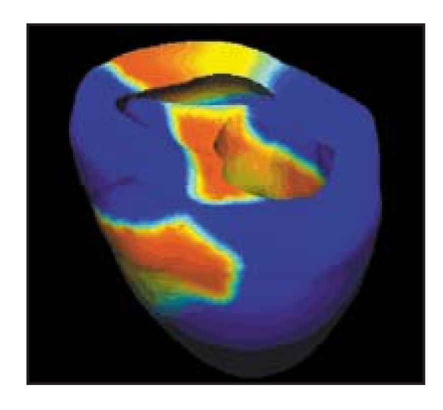
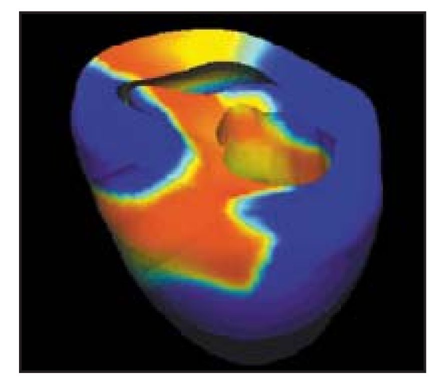
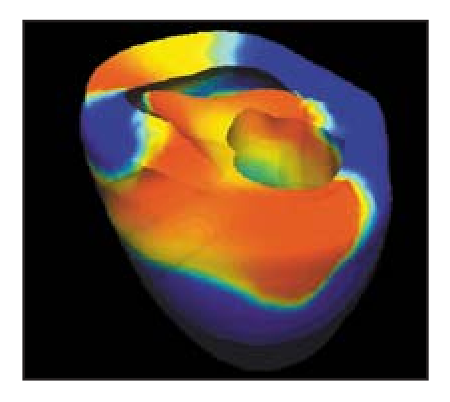
glio gástrico de la langosta [un haz nervioso que va al sistema digestivo del animal], cuáles son las conexiones sinápticas y cuáles los neurotransmisores. Puede que haya entre 13 y 20 neuronas en un ganglio, pero todavía no se ha podido descifrar su comportamiento. Ningún matemático pensaría nunca que comprender un sistema que tenga 13 variables vaya a ser tarea fácil. Y [ahora con el genoma humano] queremos hacerlo con 100.000 variables. Definamos el estado de la red como los valores actuales encendido-apagado de los 100.000 genes. ¿Cuántos estados hay? Pues bien, hay dos posibilidades para el gen uno y dos para el gen dos, y así sucesivamente, de modo que hay $2^{100.000}$ estados, lo que aproximadamente equivale a $10^{30.000}$. Así pues, aun cuando tratáramos a los genes como "activos" e "inactivos" únicamente (lo cual es falso, porque muestran niveles graduados de actividad), hay $10^{30.000}$ posibles estados. Es alucinante, porque el número de partículas en el universo conocido es de 10^{80}.

P. ¿Dónde nos encontramos al respecto?

R. Estamos en el mismísimo principio, pero llegará un día en el que vendrá alguien con cáncer y se le diagnosticará con precisión, no simplemente por la morfología de la célula cancerosa, sino mirando a los modelos detallados de la expresión génica y de las actividades de unión proteica de esa célula.

P. ¿Cuánto queda para eso? ¿Un año? ¿Doscientos?

R. En los diez o doce años próximos se dispondrá de los instrumentos adecuados. Luego es cuando se empezará a progresar realmente, obteniendo los circuitos de grandes fragmentos del genoma y comprendiendo de verdad cómo funciona. Creo que en treinta o cuarenta años se dominarán los principales fragmentos.

MODELO INFORMATICO DE UN CORAZON en fibrilación. Muestra ondas de actividad eléctrica descoordinada extendiéndose por el órgano. El modelo se basa en la expresión de cuatro genes cuya función resulta alterada en la insuficiencia cardíaca crónica.

tratégicas, firman acuerdos de licencias y adquieren empresas más pequeñas. La utilización de socios y de distribuidores no sólo les permite cubrir los vacíos de sus propias capacidades bioinformáticas, sino que les proporciona flexibilidad para adaptarse a las novedades que se vayan produciendo, en vez de tener que revisar constantemente sus propios sistemas.

Empresas como Human Genome Sciences, Celera e Incyte están a horcajadas entre las grandes compañías farmacéuticas y los servicios de integración y extracción de datos ofrecidos por las especializadas. Han aprovechado sin vacilar y con rapidez el grado de automatización que la bioinformática ha aportado a la biología.

Toda esta variedad conlleva la posibilidad de malas comunicaciones. Cada vez resulta más importante conseguir la compatibilidad entre bases de datos diferentes (lo que se denomina interoperabilidad), pudiendo los usuarios pasar rápidamente de una a otra para satisfacer sus necesidades. Una solución obvia sería la anotación: poner etiquetas a los datos con nombres que tengan referencias cruzadas entre las bases de datos una vez que se haya bautizado a los sistemas. Esto ha funcionado hasta cierto punto. Roche Bioscience ha conseguido relacionar bases de datos mediante anotación. Pero una anotación de una base puede cambiar sin que las referencias de las restantes se actualicen, sobre todo cuando el flujo de nuevos datos es constante, problema que se agudiza con el aumento de los conocimientos biológicos y la capacidad de realización de análisis por ordenador.

Las mejoras sistemáticas ayudarán, pero el progreso y, en última instancia, el beneficio siguen dependiendo del ingenio de los usuarios finales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRENDS IN COMMERCIAL BIOINFORMATICS. Informe publicado el 13 de marzo de 2000, de Jason Reed, de Oscar Gruss & Son. Puede obtenerse una copia gratis en www.oscargruss.com/reports.htm.

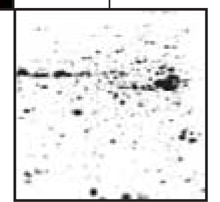
USING BIOINFORMATICS IN GENE AND DRUG DISCOVERY. D. B. Searls en *Drug Discovery Today*, vol. 5, n.º 5, páginas 135-143; abril, 2000.

BioInform, una hoja informativa bisemanal sobre el tema de la bioinformática. Puede accederse a ella en www.bioinform.com.

Se puede acceder a las bases de datos bioinformáticas mantenidas por el Centro Nacional de Información Biotécnica (NCBI), en www.ncbi.nlm.nih.gov.

MAS ALLA DEL GENOMA HUMANO





Ya se conoce la totalidad del ADN que especifica a los seres humanos. Ahora se trata de aplicar este conocimiento. Puede que los primeros frutos se cosechen en un nuevo campo denominado proteómica

Carol Ezzell

Los genes hacen furor en nuestros días, pero ya están empezando a quedarse anticuados. Cuando ya se han descifrado las aproximadamente 100.000 unidades que constituyen el genoma humano, surgen nuevas industrias destinadas a sacar provecho de los detalles de su actividad y a identificar y a determinar las propiedades de las proteínas que los genes determinan. Tal propósito ha atraído hasta ahora centenares de millones de euros de diversas fuentes de financiación. El término recién acuñado de “proteómica” pudiera servir para denominarlo.

La principal cuestión actual no son ya los genes, sino lo que se haga con ellos, en opinión de William A. Haseltine, presidente y director ejecutivo de Human Genome Sciences, de Rockville, Maryland.

Hay que seguir avanzando para comprender los restantes elementos del proceso biológico y reunir toda esta información. Ya se dio por sentado que el genoma [humano] estaría completo dentro de este año y ahora se trata de continuar el trabajo.

La próxima etapa la constituyen en su mayor parte los ARN mensajeros (ARNm) y las proteínas. Si el ADN es el anteproyecto maestro que la célula utiliza para construir las proteínas, el ARNm sería el plano parcial que el contratista lleva a la obra cada día. El ADN permanece en el núcleo de la célula; los ARNm transcritos desde los genes activos lo abandonan para ocuparse de la fabricación de proteínas.

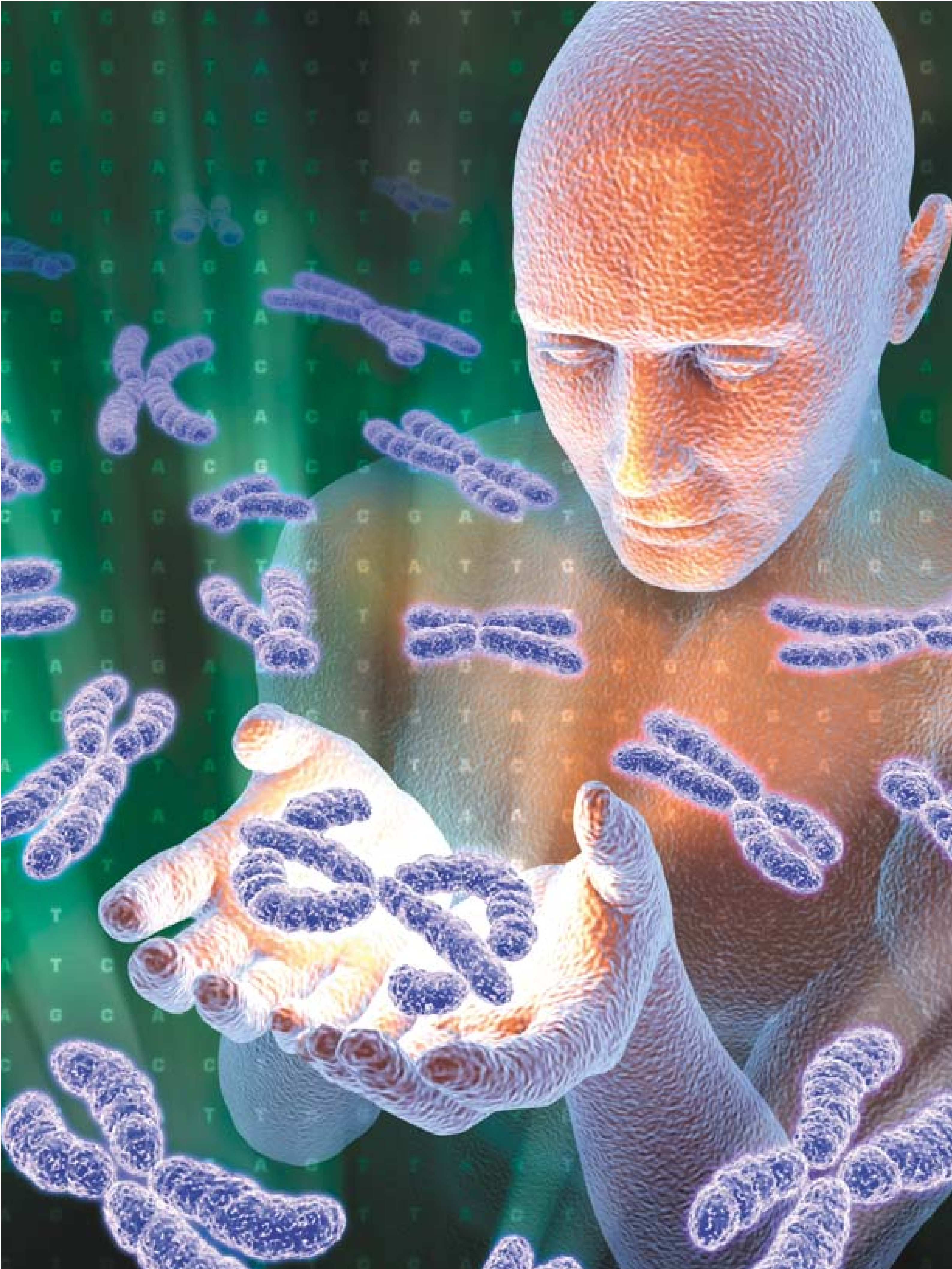
Aunque cada una de las células del organismo contenga todo el ADN que especifica la fabricación y el mantenimiento del ser humano, muchos de ellos nunca “se activan”, es decir, no se copian en ARNm, una vez finalizado el desarrollo embrionario. Los hay que se activan y se desactivan en diferentes momentos, en función del tejido en el que se encuentren y de su papel en el organismo. Una célula beta pancreática, por ejemplo, suele estar repleta de las instrucciones de ARNm necesarias para fabricar insulina, cosa que no le sucede a una célula nerviosa del cerebro.

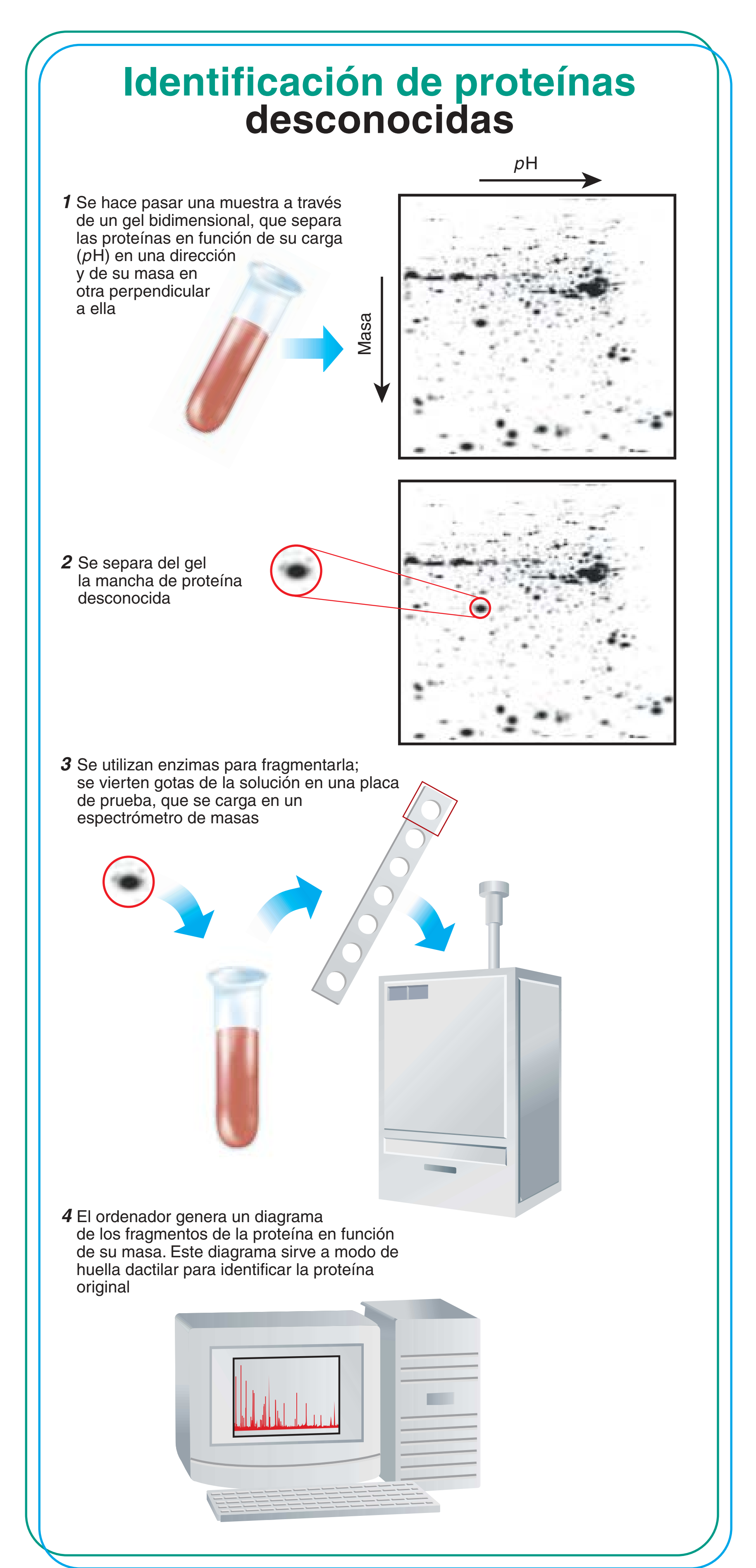
Antes solía decirse que un gen equivale a un ARNm y a una proteína, pero la realidad es mucho más complicada. Ahora se sabe que los genes pueden leerse por partes, que se empalman y se cortan para generar diversos ARNm y que el procesamiento subsiguiente de las proteínas recién formadas para las que codifican esos transcritos puede alterar su función. La consecuencia de esto es que la secuencia de ADN del genoma humano no cuenta más que una pequeña parte de la historia de lo que hace una célula concreta. Los investigadores tienen que prestar atención también al transcriptoma (el conjunto de ARNm que una célula produce en un momento dado) y al proteoma, todas las proteínas que se sintetizan en función de las instrucciones que hay en esos ARN.

Una de las técnicas utilizadas para estudiar el transcriptoma humano es el sistema GeneChip, desarrollado por Affymetrix en Santa Clara, California. El sistema se basa en laminillas de vidrio del tamaño de una uña, denominadas *microarrays*, que se revisten con una fina capa de los denominados ADNc, que representan todos los ARNm sintetizados por un tipo concreto de célula. (La abreviatura ADNc significa ADN complementario; consiste, en esencia, en ARNm traducido artificialmente de nuevo a ADN, pero sin las secuencias no codificantes, o intrones, que se encuentran en el ADN genómico original.)

Para utilizar este sistema, se aísla el ARNm de su muestra celular, se etiqueta con un marcador químico y se vierte en la placa. Observando a qué parte del ADNc se empareja y se une la muestra del ARNm, pueden identificarse las secuencias de ARNm de una muestra. Affymetrix lanzó dos nuevos conjuntos de placas para analizar muestras de células humanas a principios de este año. Uno permite la identificación de más de 60.000 ARNm humanos; con el otro se pueden detectar en las células unos 1700 ARNm humanos relacionados con el cáncer.

LAS RECOMPENSAS GENOMICAS vendrán de los nuevos sectores de la transcriptomía y de la proteómica, que se dedican a determinar los detalles de activación de los genes y a identificar las proteínas que determinan.





El Instituto Nacional del Cáncer de Bethesda, Maryland, lleva ya más de dos años examinando los ARNm producidos por varios tipos de células cancerosas. Se trata de un proyecto llamado Indice de los genes tumorales humanos, en el que colaboran laboratorios públicos y universitarios junto a diversas compañías farmacéuticas, entre ellas Bristol-Myers Squibb, Genentech, Glaxo Wellcome y Merck. Hasta la fecha se han identificado más de 50.000 genes que están activos en uno o más tipos de cáncer. Por ejemplo, se ha encontrado que en las células de cáncer de mama actúan 5692 genes, entre ellos 277 que no lo hacen en otros tejidos. Sustancias químicas dirigidas contra las proteínas producidas por esos 277 genes pudieran servir como medicamentos anticancerosos que tuvieran menos efectos secundarios que los actuales. El Instituto Nacional del Cáncer estadounidense ha iniciado recientemente un proyecto proteómico tisular, multimillonario en dólares, en asociación con la Administración de fármacos y alimentos de Estados Unidos para identificar las proteínas implicadas en el cáncer.

Los estudios del ARNm no son en el fondo más que un medio para entender mejor las proteínas de una línea de producción celular, pues son ellas a fin de cuentas las dianas de los fármacos. Lo que son muchas dianas, si se consideran los 100.000 genes humanos, más o menos, que se piensa que producen más de un millón de proteínas. Jean-François Formela, de Atlas Venture de Boston, calcula que la industria farmacéutica tendrá que evaluar unas 10.000 proteínas humanas en los próximos diez años para dirigir contra ellas los nuevos remedios, lo que representa más de 25 veces el número analizado por las compañías farmacéuticas desde sus albores.

Mark J. Levin, de Millenium Pharmaceuticals, en Cambridge, Massachusetts, dice que las grandes compañías farmacéuticas tienen que descubrir cada año entre tres y cinco candidatos a medicamentos nuevos para crecer entre un 10 y un 20 por ciento anual, lo que es el incremento mínimo exigido por los accionistas. Las principales de ellas no producen actualmente más que entre medio y uno y medio al año, lo que deteriorará sus posibilidades bursátiles futuras. Millenium tiene un acuerdo con Bayer para someter a pruebas preliminares 225 blancos "medicables" en los próximos años.

La expresión de las proteínas encandila actualmente la imaginación de los investigadores. No sólo hay que atender a los genes y a su expresión, sino también a las formas de las proteínas.

Los investigadores del monstruo secuenciador de ADN, Celera, se cuentan entre los interesados en el estudio de la expresión proteínica, o proteómica. Celera negocia con GeneBio, una rama mercantil del Instituto Suizo de Bioinformática de Ginebra, para constituir una compañía dedicada a catalogar el proteoma humano completo. Denis F. Hochstrasser, uno de los fundadores de GeneBio, y su equipo publicaron el pasado año los planes para un escáner molecular que automatizaría el ahora tedioso proceso de separar e identificar los millares de tipos de proteínas que hay en una célula.

El método que actualmente se utiliza para estudiar las proteínas consiste en parte en una técnica denominada electroforesis en gel bidimensional, que permite separarlas por carga y por tamaño. Se inyecta una solución de contenido celular en una estrecha tira de polímero en la que se ha creado un gradiente de acidez. Cuando la tira se expone a una corriente eléctrica, cada proteína de la mezcla se sitúa en una capa, en función de su carga. Luego se coloca la tira a lo largo del borde de un gel plano y se expone de nuevo a la electricidad. Conforme las proteínas migran a través del gel, se separan en función de su peso molecular. Lo que resulta es un modelo manchado de puntos, cada uno los cuales contiene una proteína diferente.

Los investigadores de los laboratorios universitarios suelen utilizar una especie de punzón para separar las manchas de proteínas de los geles bidimensionales, de modo que pueda procederse a su identificación individual por otro método, la espectroscopía de masas (*véase recuadro de la página opuesta*). Pero las compañías Large Scale Biology en Vacaville, California, y Oxford GlycoSciences (OGS) de Oxford, Inglaterra, utilizan máquinas automáticas para hacerlo. OGS tiene un contrato con Pfizer para analizar muestras de líquido cefalorraquídeo tomado de pacientes que se encuentran en estadios diversos de la enfermedad de Alzheimer.

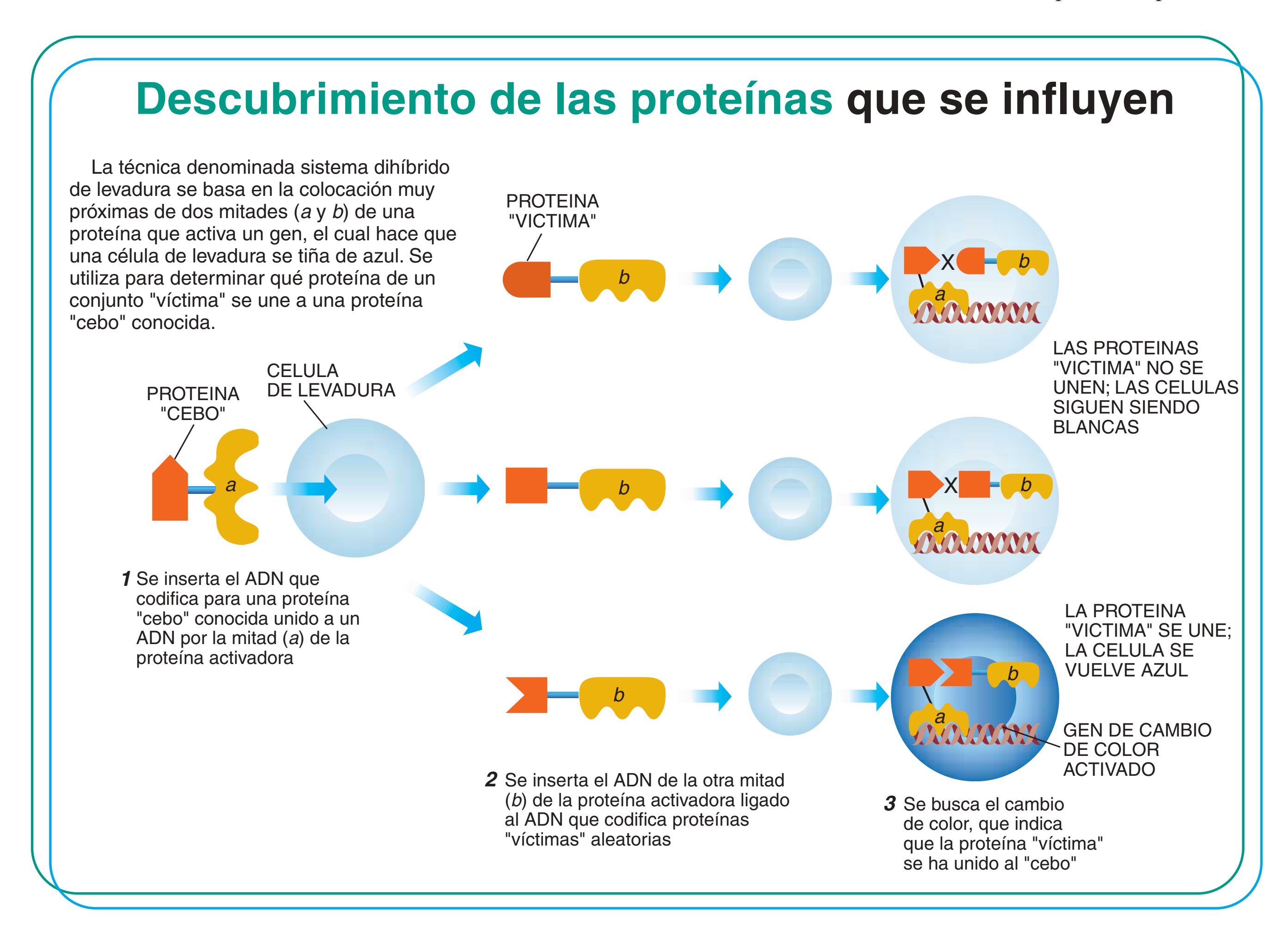
La máquina inventada por Hochstrasser y los suyos va un paso más allá de las utilizadas por Large Scale Biology y OGS. Permitirá extraer automáticamente las manchas proteicas de los geles, utilizará enzimas para cortar las proteínas en fragmentos, introducirá los fragmentos en un espectrómetro de masas láser y transferirá la información a un ordenador para su análisis. El fabricante del instrumento, PE Corporation, que es la dueña de Celera, ya ha tomado la decisión de hacerlo.

Con y sin la ayuda de brazos mecánicos, los geles bidimensionales plantean sus problemas. Aparte de que su elaboración es algo complicada, no permiten una resolución muy buena de las proteínas de mucha carga o de poca masa. También resuelven mal las proteínas que tengan regiones hidrófobas, como las que atraviesan la membrana celular. Esto constituye una notable limitación, ya que los receptores que atraviesan la membrana son importantes dianas farmacológicas.

Otro método para estudiar proteomas es lo que Stepehn Oliver, de la Universidad de Manchester, Inglaterra, ha llamado "culpabilidad por aso-

Descubrimiento de las proteínas que se influyen

La técnica denominada sistema dihíbrido de levadura se basa en la colocación muy próximas de dos mitades (*a* y *b*) de una proteína que activa un gen, el cual hace que una célula de levadura se tiña de azul. Se utiliza para determinar qué proteína de un conjunto "víctima" se une a una proteína "cebo" conocida.



1 Se inserta el ADN que codifica para una proteína "cebo" conocida unido a un ADN por la mitad (*a*) de la proteína activadora

2 Se inserta el ADN de la otra mitad (*b*) de la proteína activadora ligado al ADN que codifica proteínas "víctimas" aleatorias

3 Se busca el cambio de color, que indica que la proteína "víctima" se ha unido al "cebo"

LOS PRINCIPALES ACTORES



Ciphergen Biosystems

www.ciphergen.com

Prepara su inmediata cotización en bolsa
Sede central: Palo Alto, California
Jefe máximo: William E. Rich, presidente y CEO
Principales clientes/socios: Human Genome Science, Parke-Davis, Aventis, SmithKline Beecham
Estrategia: Fabricación y comercialización de instrumentos y de láminas para la identificación de proteínas.
Financiación este año: 28,6 millones de dólares
Propósito fundamental: lograr la aceptación generalizada de la espectrometría de masas como instrumento habitual de laboratorio
Ventaja competitiva: pionera en la utilización de la espectrometría de masas para el análisis de proteínas

CuraGen

www.curagen.com

Símbolo: CRGN
Sede central: New Haven, Connecticut
Jefe máximo: Jonathan M. Rothberg, presidente, director y CEO
Principales clientes/socios: Pioneer Hi-Bred International, Ganentech, Biogen, Glaxo Wellcome
Estrategia: Utilizar la proteómica para encontrar nuevas dianas farmacológicas para la propia empresa y para sus socios
Financiación anual: 150 millones de dólares
Propósito fundamental: hacer avanzar las técnicas proteómicas propias y desarrollar sus propios fármacos
Ventaja competitiva: gran capacidad cartográfica de las interrelaciones de proteínas

Hybrigenics

www.hybrigenics.com

Empresa privada
Sede central: París
Jefe máximo: Donny Stroberg, CEO
Principales clientes/socios: Institut Pasteur, BioSignal, Lynx Therapeutics
Estrategia: proporcionar mapas de interacción proteica de la totalidad de la célula y servicios de descubrimiento de dianas farmacológicas y de validación
Financiación anual: dato no disponible
Propósito fundamental: introducirse en Estados Unidos
Ventaja competitiva: utiliza bioinformática muy avanzada para sus análisis

Large Scale Biology

www.lsbc.com

Cotizará en bolsa de inmediato
Sede central: Vacaville, California
Jefe máximo: Robert L. Erwin, presidente y CEO
Principales clientes/socios: Glaxo Wellcome, Procter & Gamble, Novartis, Genentech, Dow
Estrategia: técnicas de trabajo con proteínas y suministro de información
Financiación anual: dato no disponible
Propósito fundamental: desarrollar el negocio como corresponde a su tamaño y a la cotización en bolsa
Ventaja competitiva: 15 años de experiencia en proteómica

Oxford GlycoSciences

www.ogs.com

Símbolo: OGS (Londres)
Sede central: Oxford, Inglaterra
Jefe máximo: Michael Kranda, CEO
Principales clientes/socios: Pfizer, Bayer, Merck, G. D. Searle, Incyte Genomics
Estrategia: Utilizar la proteómica y el estudio de las moléculas de azúcar ligadas a las proteínas (glicobiología y glicoquímica) para descubrir nuevas terapias y diagnósticos
Financiación anual: 23,2 millones de libras
Propósito fundamental: lograr la validación clínica de sus esfuerzos
Ventaja competitiva: métodos de análisis de proteínas muy automatizados y a gran escala

Myriad Genetics

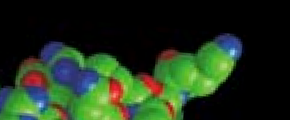
www.myriad.com

Símbolo: MYGN
Sede central: Salt Lake City
Jefe máximo: Peter D. Meldrum, director, presidente y CEO
Principales clientes/socios: Bayer, Eli Lilly, Pharmacia, Novartis, Roche, Schering y Schering-Plough
Estrategia: Vender pruebas genéticas; proporcionar datos sobre interacciones proteína-proteína para que sus clientes encuentren dianas farmacológicas
Financiación anual: nula en el presente año
Propósito fundamental: prestación de servicios al tiempo que desarrolla sus propios medicamentos; mantenimiento del negocio de diagnóstico molecular
Ventaja competitiva: empresa bien conocida que se refuerza con socios importantes

Affymetrix

www.affymetrix.com

Símbolo: AFFX
Sede central: Santa Clara, California
Jefe máximo: Stephen P. A. Fodor, director y CEO
Principales clientes/socios: Ha instalado más de 250 sistemas GeneChip en todo el mundo
Estrategia: vender sustratos génicos y máquinas analizadoras para uso diagnóstico y de investigación
Financiación anual: 150 millones de dólares
Propósito fundamental: encontrar nuevos mercados para sus productos
Ventaja competitiva: es la primera compañía que ha comercializado las láminas génicas



ciación": se aprende sobre la función de una proteína evaluando sus influjos sobre otra cuyo papel celular se conozca. Los investigadores de CuraGen, New Haven, Connecticut, publicaron en febrero (junto con el equipo de Stanley Fields, del Instituto Médico Howard Hughes, de la Universidad de Washington) que habían deducido 957 interrelaciones entre 1000 proteínas de la levadura del pan *Saccharomyces cerevisiae*. El equipo de Fields ideó un método que se utiliza mucho para estudiar las interacciones proteicas y que se conoce como sistema dihíbrido de levadura, en el que se utilizan proteínas "cebo" conocidas para encontrar las proteínas "víctima", que se unen a los "cebos" (*véase el recuadro*).

El genoma de la levadura consta de 6000 genes, cosa que se sabe desde que se secuenció en 1996, pero las funciones de la tercera parte de ellos siguen siendo misteriosas. Descifrando cuál de las proteínas desconocidas se asociaba con las previamente identificadas, los investigadores de CuraGen y de la Universidad de Washington lograron clasificarlas en categorías funcionales, como pudieran ser las de generadoras de energía, reparadoras del ADN y proteínas del envejecimiento.

CuraGen anunció en marzo que se había unido al equipo del Proyecto genoma de *Drosophila* de Berkeley para producir un mapa de proteína-interacción de la mosca de la fruta, usando un método de paralelismo en gran escala. El director del proyecto Berkeley es Gerald M. Rubin, un investigador del Instituto Médico Howard Hughes, de la Universidad de California, en Berkeley, que colaboró con Celera en la secuenciación del genoma de *Drosophila* (*véase el recuadro* "Los otros genomas")

Consideran que la levadura fue un prototipo, pero que *Drosophila* es lo adecuado cuando se trata de estudiar un organismo multicelular. Aspiran a utilizar la proteómica para descubrir nuevos medicamentos que sus clientes puedan comercializar. CuraGen también trabajará para identificar dianas de fármacos que venderá por su cuenta.

Uno de sus competidores es Myriad Genetics, compañía biotécnica situada en Salt Lake City, más conocida por sus pruebas para los genes *BRCA*, que contribuyen a los cánceres de mama y de ovario. Myriad firmó un acuerdo de 13 millones de dólares con Roche a principios de este año, por el que le prestará sus técnicas proteómicas para descubrir las dianas de posibles fármacos cardiovasculares.

Myriad utiliza también una variante del sistema dihíbrido de la levadura, pero se concentra en vías patológicas específicas en vez de evaluar los genomas enteros. La compañía tiene ahora mismo una alianza con Schering-Plough, por ejemplo, para sondear los efectos bioquímicos de las proteínas codificadas por un gen llamado MMAC1, que puede inducir cáncer de cerebro y de próstata cuando muta.

Otra forma de estudiar las proteínas, disponible desde hace poco, consiste en las denominadas láminas de proteínas. Ciphergen Biosystems, una compañía de Palo Alto, vende una gama de tiras diseñada para aislar proteínas en función de diversas propiedades, como su capacidad de disolución en agua o de unión a átomos de metal cargados. Las tiras se colocan luego en un aparato lector, un espectrómetro de masas, para identificar las proteínas.

Uno de sus resultados iniciales fue el descubrimiento de marcadores precoces del cáncer de próstata. George L. Wright, Jr., de la Facultad de medicina de Virginia, en Norfolk, publicó el pasado mes de diciembre la utilización del sistema de Ciphergen para identificar 12 "biomarcadores" candidatos para la enfermedad prostática benigna y seis de ellos para el cáncer de próstata. Las pruebas basadas en proteínas podrían permitir una mejor discriminación entre estados benignos y cancerosos de la próstata que la proporcionada por la actual prueba del antígeno prostático específico (PSA).

La identificación de todas las proteínas de un ser humano es una cosa, pero para comprender de verdad la función de una proteína es necesario discernir su forma y su estructura. Un grupo bien conocido de biólogos estructurales, liderado por Stephen K. Burley, de la Universidad de Rockefeller, propuso una "iniciativa genómica estructural" de utilización de la cristalografía de rayos X cuasiautomatizada para estudiar proteínas normales y anómalas, en un artículo publicado en *Nature Genetics* el pasado mes de octubre.

La purificación de una molécula según la biología estructural clásica consiste en hacerle formar cristales con paciencia, que luego se bombardean con rayos X. Los rayos X rebotan de los átomos de las moléculas, proporcionando modelos de difracción que pueden interpretarse hasta obtener la forma tridimensional general de la molécula. Para que se consolidase un proyecto genómico estructural tendría que aumentarse proporcionalmente la escala y la velocidad de las técnicas actuales.

Los Institutos Nacionales de la Salud estadounidenses concederán este año subvenciones por valor de 20 millones de dólares a los centros universitarios con destino a los estudios de genómica estructural. También las empresas privadas están entrando en el juego. Syrix, de la Jolla, California, Structural GenomiX, de San Diego, y Chalon Biotech, de Toronto, se han fundado para desarrollar las denominadas técnicas cristalográficas de rayos X de elevado rendimiento.

Conocer la forma estructural exacta de cada una de las proteínas del proteoma humano debería ayudar, en teoría, a los proyectistas de fármacos a idear productos químicos que encajen en las muescas proteicas que las activen o que las impidan actuar. Estos esfuerzos, a los que suele denominarse proyecto racional de fármacos, no han cosechado éxitos abrumadores hasta ahora. La verdad es que no se ha determinado más que el uno por ciento de la estructura de todas las proteínas humanas. Cuando se consiga catalogar el proteoma humano, serán las proteínas y no los genes las que hagan furor.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROTEOMICS GEARS UP. K. Garber en la publicación en línea *Signals* (www.signalsmag.com); 2 de noviembre de 1999.

A POST-GENOMIC CHALLENGE: LEARNING TO READ PATTERNS OF PROTEIN SYNTHESIS. A. Abbot en *Nature*, vol. 402, páginas 715-720; 16 de diciembre, 1999.

DIFFERENTIATING GENOMICS COMPANIES. R. James en *Nature Biotechnology*, vol. 18, páginas 153-155; febrero 2000.

STRUCTURAL GENOMICS OFFERS HIGH-SPEED LOOK AT PROTEINS. R. F. Service en *Science*, vol. 287, páginas 1954-1956; 17 de marzo, 2000.

Puede verse diversa información sobre el Proyecto Genoma Humano y sus consecuencias en www.nature.com/genomics/ de Internet.

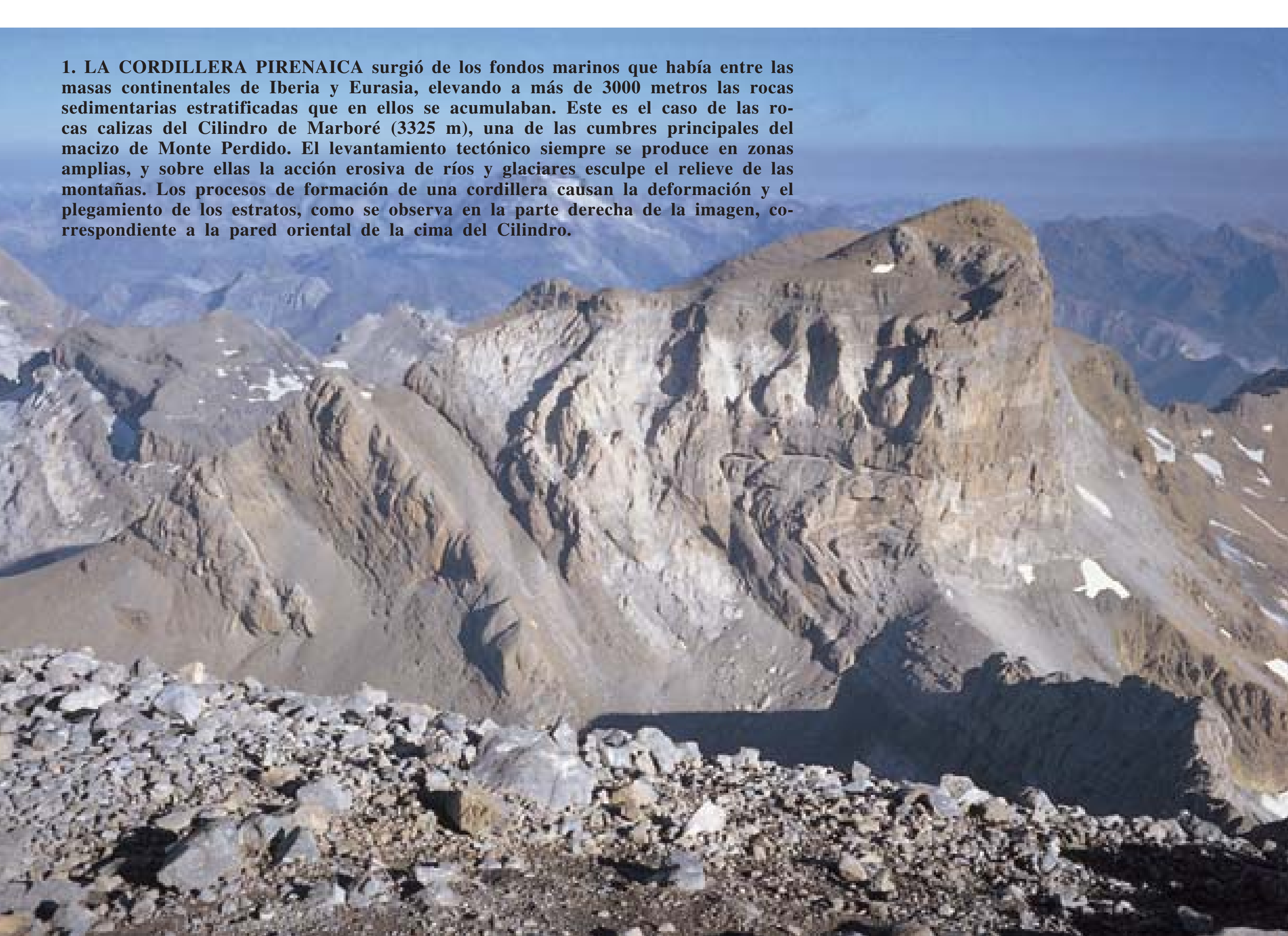
Geotectónica de los Pirineos

La colisión entre las placas Ibérica y Eurasiática cerró el mar del que, hace 80 millones de años, surgieron los montes Pirineos. La cordillera actual se sostiene por una profunda raíz cortical que se adentra en el manto terrestre

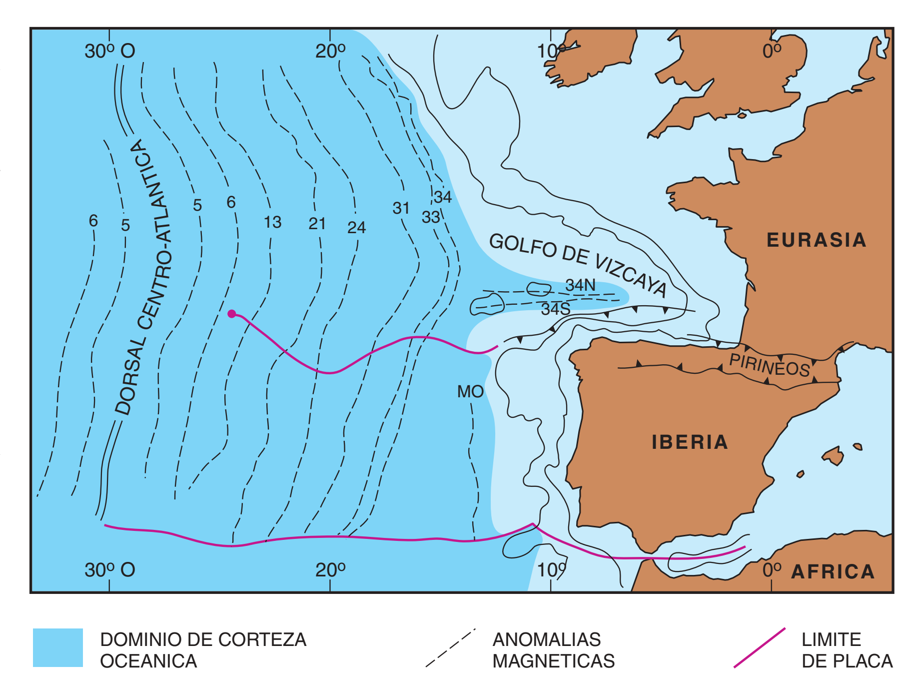
Antonio Teixell

Tras largo tiempo a la deriva, Iberia se dirigió firmemente hacia el norte y comenzó el proceso de convergencia con Europa. Ocurría eso en realidad hace 80 millones de años, y del proceso surgieron los Pirineos. Lejos estaba *Lepidotes ilergetis*, pez osteíctio que nadaba en las plácidas aguas que durante el Cretácico cubrían la región de la actual sierra del Montsec, al norte de Lérida, de intuir que su mar había de convertirse en una escarpada cordillera montañosa, elevándose el fondo marino a más de 3000 metros en algunos sectores. Desde la geotectónica buscamos respuesta a cuestiones como por qué el antiguo brazo de mar evolucionó a una cadena de montañas y qué tipo de fuerzas y procesos actuaron en su edificación.

Desde comienzos de los años setenta se busca una explicación del origen de los Pirineos en el marco de la teoría de la tectónica de placas. Así hemos de entender la investigación de la geología regional y el empeño por hallar un modelo geodinámico global para la cadena, en el que queden reflejadas su peculiaridad singular y sus características comunes con otras cordilleras.



1. LA CORDILLERA PIRENAICA surgió de los fondos marinos que había entre las masas continentales de Iberia y Eurasia, elevando a más de 3000 metros las rocas sedimentarias estratificadas que en ellos se acumulaban. Este es el caso de las rocas calizas del Cilindro de Marboré (3325 m), una de las cumbres principales del macizo de Monte Perdido. El levantamiento tectónico siempre se produce en zonas amplias, y sobre ellas la acción erosiva de ríos y glaciares esculpe el relieve de las montañas. Los procesos de formación de una cordillera causan la deformación y el plegamiento de los estratos, como se observa en la parte derecha de la imagen, correspondiente a la pared oriental de la cima del Cilindro.



2. LOS PIRINEOS SE HALLAN EN EL LIMITE, hoy inactivo, entre las placas de Iberia y Eurasia. Ambas placas se extienden hasta la dorsal Centro-Atlántica y constan por tanto de un área compuesta por corteza continental y un área compuesta por corteza oceánica. Las franjas de anomalía magnética de los basaltos oceánicos reflejan la expansión del océano Atlántico a partir del eje de simetría de la dorsal centro-oceánica, proceso que causó la separación entre América y Europa desde tiempos cretácicos hasta la actualidad. En la figura se representan las principales franjas numeradas de forma decreciente: cuanto menor es el número de la anomalía, más reciente es la franja de corteza que la contiene, y así hasta llegar a la dorsal, zona donde se crea corteza oceánica en la actualidad. A mediados del Cretácico, un apéndice del océano Atlántico en el golfo de Vizcaya constituía el límite de placas entre Iberia y Eurasia. Se trataba también de una dorsal, es decir, de otro límite de placas divergente, que se situaba entre las dos franjas simétricas de anomalía 34 (83-84 millones de años) que se trazan en el golfo. La anomalía 33 (75 m.a.) ya no entra en el golfo; es posterior a su efímera historia de expansión. Durante el Cretácico terminal y el Terciario, la cinemática de las placas cambió radicalmente, y el límite entre Iberia y Eurasia pasó a ser de tipo convergente. No obstante, el conjunto seguía separándose de América. La aproximación entre Iberia y Eurasia originó los montes Pirineos en tierra firme, y más al oeste, en el golfo de Vizcaya, el límite de placas "saltó" hacia el sur, abandonando el antiguo eje de expansión oceánica del golfo y formando las nuevas estructuras cabalgantes del margen cantábrico. La terminación occidental del límite de placas en el fondo situado entre las anomalías 13 y 6 del Atlántico (en una porción de corteza de unos 20 millones de años de antigüedad) refleja el momento en que la placa Ibérica quedó definitivamente soldada a Eurasia, a partir del cual las dos inician una trayectoria común e indisociable.

Aunque quedan incógnitas por despejar, nos vamos acercando a una imagen coherente de la estructura actual y de los fenómenos que originaron las montañas pirenaicas, gracias a un conocimiento cada vez mejor de la geología de superficie y de los fondos marinos adyacentes, al que se ha sumado en los quince últimos años un espectacular avance en las investigaciones geofísicas del subsuelo profundo.

Desde el punto de vista geológico los Pirineos no se limitan a las sierras que forman el istmo entre la península Ibérica y Francia, sino que las rocas y estructuras pirenaicas se continúan lateralmente hacia el oeste por los relieves de la cornisa cantábrica y por el margen continental sumergido bajo el mar Cantábrico: existe un "Pirineo" bajo el agua hasta las costas al norte de Galicia. La comprensión del orógeno pirenaico no puede disociarse de la del golfo de Vizcaya, pieza clave en su evolución. Aunque con una orientación diferente, estructuras tectónicas de edad comparable a la de los Pirineos se encuentran también hacia el NE en los montes del Languedoc y Provenza, hasta enlazar con el cinturón de los Alpes.

La tectónica de placas enuncia que la capa rígida externa de la Tierra o litosfera consta de un mosaico de placas que se mueven unas con respecto a otras. La región pirenaica dibuja hoy un límite de placa fósil, mediante el cual la placa Ibérica, en su día independiente, está soldada a la placa Eurasiática. Los Pirineos han dejado de crecer.

Desde la era Mesozoica, el dominio pirenaico constituía la frontera entre ambos bloques litosféricos; se dieron en ella, primero, movimientos de divergencia y deriva lateral; luego, de acercamiento y colisión. El acercamiento o convergencia de placas que originó la cordillera comenzó hacia finales del Cretácico superior, hace 85 millones de años, y prosiguió por más de 60 millones de años en la era Terciaria, hasta el Mioceno inferior.

Mucho antes, tras el ciclo orogénico Hercínico (período Carbonífero), una extensa masa continental agrupaba las tierras de Norteamérica y parte de Europa y Asia, la denominada Laurasia. En opinión de muchos geólogos, Laurasia estaba conectada con las tierras australes en el supercontinente de Pangea. Un amplio mar, mayor que el actual Mediterráneo, separaba Africa de Europa y enlazaba con el océano Pacífico, el antiguo mar de Tethys.

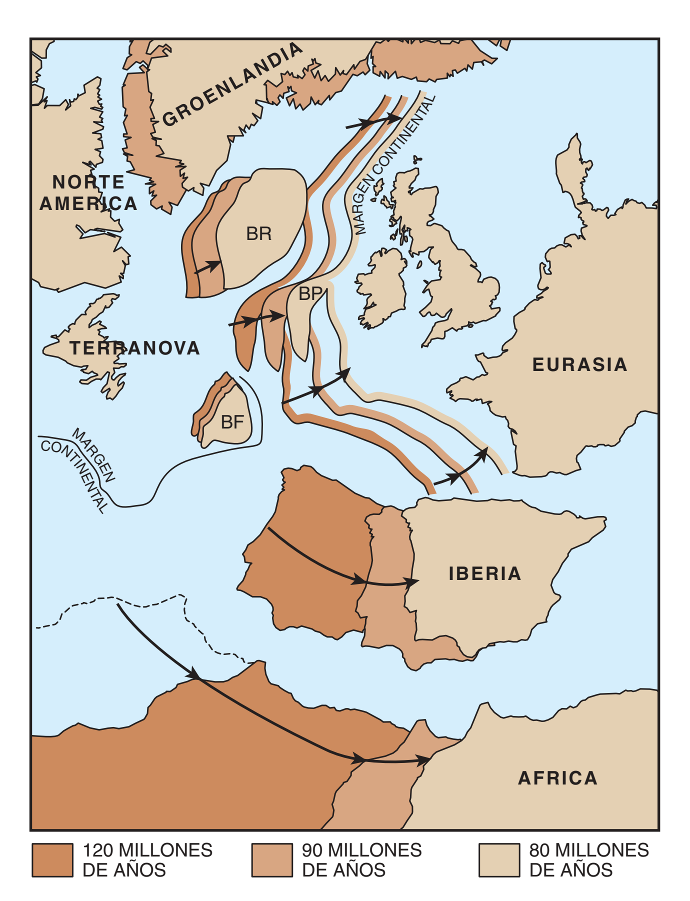
En los albores de la era Mesozoica, Laurasia comenzó un lento proceso de disgregación. Asociados a las fracturas que resquebrajaron el continente se formaron surcos sedimentarios, primero en condiciones subaéreas a lo largo del Triásico —las características areniscas rojas de Europa occidental— y, posteriormente, a lo largo del resto del Mesozoico, culminando en cuencas marinas, separando diversos fragmentos continentales a la deriva.

Dentro del proceso de expansión oceánica del Atlántico Norte y de la consiguiente separación entre Norteamérica y Europa, un fragmento de esta última se independizó y comenzó su trayectoria particular, a caballo entre Eurasia y Africa: nació la placa Ibérica. No nos ocuparemos aquí del límite meridional de esa placa pequeña, situado en el arco de Gibraltar, sino del límite septentrional, de cuya actividad son testimonio los Pirineos.

Para reconstruir la singladura de la placa Ibérica y del dominio pirenaico en las etapas previas a la orogenia (proceso de formación de la

cordillera de montañas), nos basaremos en las rocas de superficie y en la geofísica de los fondos oceánicos del entorno. En las franjas de anomalía magnética de la corteza basáltica de esas regiones nos apoyamos para reconstruir las direcciones de expansión de los fondos oceánicos y, por ende, para seguir la trayectoria de las masas continentales a lo largo del tiempo.

Antes de la formulación de la teoría de la tectónica de placas, la comparación entre los márgenes continentales y la geología de superficie de Asturias, Galicia y Bretaña llevó a W. S. Carey a proponer en 1958 que la costa cantábrica estuvo antiguamente unida a la bretona, y que había que cerrar el golfo de Vizcaya para reconstruir la geografía del pasado. Transcurridos poco más de 10 años se confirmaron sus ideas: R. Van der Voo encontró una diferencia de 30-35º entre los vectores paleomagnéticos registrados en las rocas pérmicas de la península Ibérica y de la Europa estable; Iberia debía de haber girado tal magnitud desde la formación de las rocas de aquella edad. Independientemente, C. A. Williams halló franjas de anomalía magnética —indicio de la expansión de la corteza oceánica— en el interior del golfo de Vizcaya, verdadero apéndice del océano Atlántico, tal como Carey había predicho.



3. RECONSTRUCCION DE LA TRAYECTORIA de las placas durante los procesos de expansión del océano Atlántico y del golfo de Vizcaya, en la era Mesozoica. Hace 120 millones de años, se iniciaba la expansión oceánica del Atlántico norte, justo antes de la formación de la primera anomalía magnética, o anomalía M0. Los siguientes estadios ilustran la rotación y deriva lateral de Iberia respecto a Eurasia, al tiempo que el conjunto se separaba de la placa Americana. La posición final del esquema, hace poco más de 80 millones de años, retrata la situación en el momento en que Iberia invierte su movimiento, aproximándose a Eurasia y originando los Pirineos. La línea y flecha discontinuas de la parte inferior izquierda del esquema indican el desplazamiento de Africa respecto a Iberia con anterioridad a 120 millones de años. Esta reconstrucción ha sido trazada a partir de los trabajos de J. L. Olivet y P. Beuzart. BP: Banco de Porcupine. BR: Banco de Rockall; BF: Banco Flamenco.

norte de los Pirineos, en zonas localizadas del Pirineo catalán, en la región vasco-cantábrica y en las plataformas continentales cantábrica y armoricana. Son nuestro testimonio estratigráfico de la fragmentación de Laurasia.

Hasta mediados del Cretácico, el Atlántico norte y el golfo de Vizcaya aún carecen de corteza oceánica, y la separación América-Europa es pequeña. Se materializa en una estrecha cuenca marina sobre corteza todavía continental, si bien adelgazada por los procesos de estiramiento.

La franja de anomalía magnética oceánica más antigua al oeste de la península Ibérica es la denominada M0, de hace 118 millones de años. Más al norte, frente a las costas francesas y británicas la primera anomalía es la 34, de edad todavía más reciente, de hace 83-84 millones de años (Cretácico superior). Entre ambas regiones media el golfo de Vizcaya y su prolongación en el antiguo surco pirenaico.

El retardo en la primera anomalía magnética registrada indica que la expansión oceánica comenzó antes en el oeste de la península Ibérica que en el resto del Atlántico norte. De ello se infiere que la región del golfo de Vizcaya-Pirineos debía constituir un límite de placas a favor del cual Iberia derivaba lateralmente hacia el este respecto a Europa. Y. Kristoffersen revisó la edad de las franjas magnéticas oceánicas del interior del golfo de Vizcaya, que formaban dos bandas simétricas orientadas E-W, y las atribuyó a la anomalía 34, proporcionando así una pieza más para el rompecabezas.

Kristoffersen se dio cuenta, además, de que la anomalía 33 (Campaniense superior, hace unos 75 millones de años) se trazaba de forma continua en el Atlántico sin entrar ya en el golfo, cerrando su efímera historia de expansión. (La edad de algunas rocas sedimentarias del fondo del golfo sugieren que la expansión pudo haberse iniciado unos 30-35 mi-

La trayectoria pre-orogénica del dominio pirenaico había comenzado con la destrucción de la antigua cordillera Herciniana y su suplantación por tierras bajas, los surcos sedimentarios mencionados. Este proceso se hallaba en estado embrionario a finales de la era Paleozoica, durante el período Pérmico, y continuó en los albores de la era Mesozoica.

Pero hay que esperar hasta el Jurásico terminal para reconocer un surco sedimentario bien definido, con la posición geográfica y orientación propia de la cordillera en la que habrá de convertirse. Durante este período, y sobre todo durante el Cretácico inferior, se produjo una separación activa entre Iberia y Europa que desencadenó, en la franja del golfo de Vizcaya-Pirineos, los siguientes procesos: extensión y adelgazamiento de la corteza continental, formación de fallas normales y hundimiento de fosas tectónicas. Las fosas representan cuencas sedimentarias subsidentes, es decir, en proceso de hundimiento progresivo, que acumulan varios miles de metros de sedimentos.

Las características de esos sedimentos reflejan predominantemente medios marinos. Desde antiguo se conocen las potentes series de rocas sedimentarias del Cretácico inferior en una franja continua de la vertiente

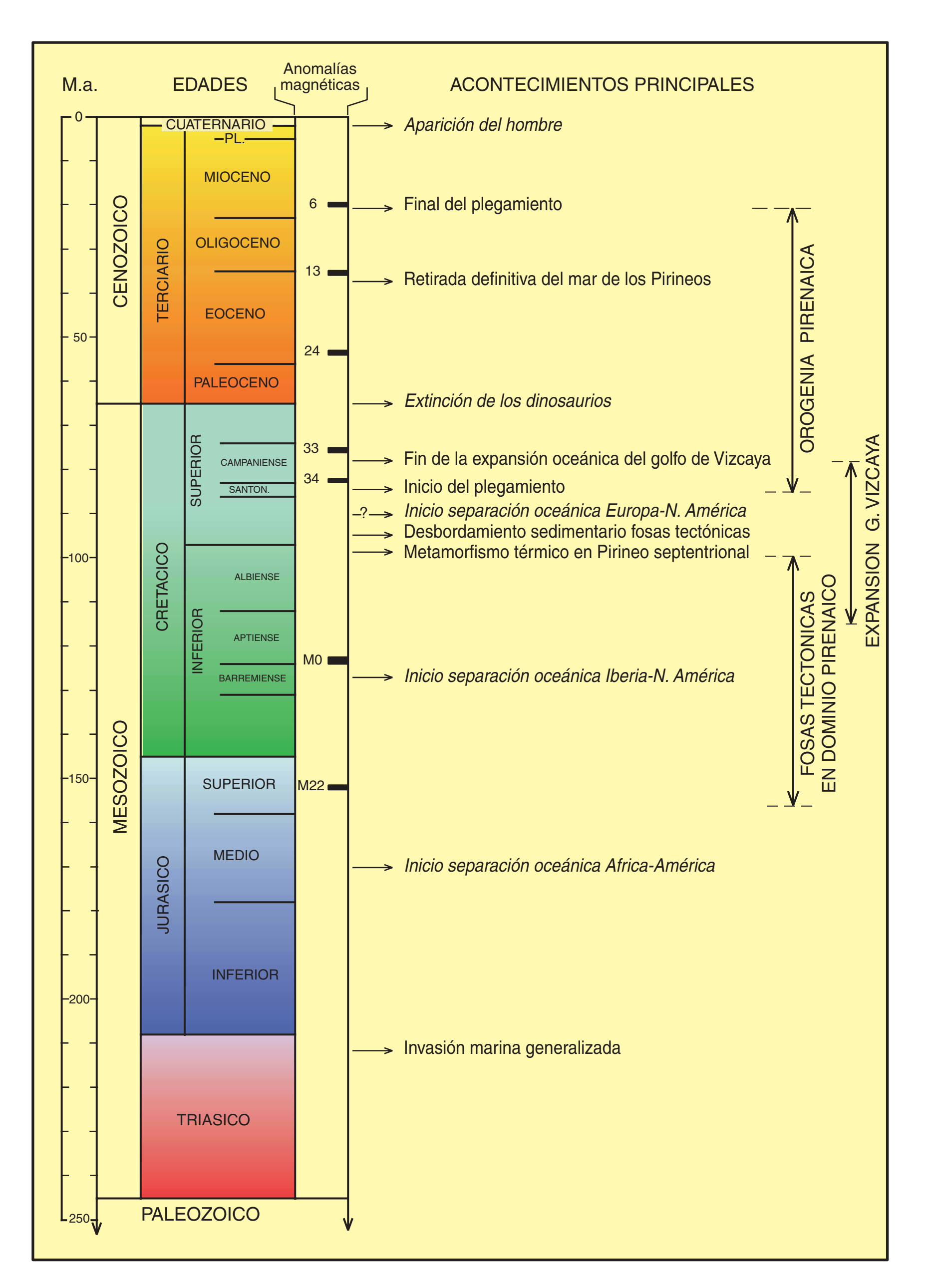
llones de años antes, en tiempos aptienses o albienses.)

El problema radica en conocer la magnitud relativa de las dos componentes de movimiento de la placa Ibérica durante la era Mesozoica, a saber, el desplazamiento lateral y la rotación inducida por la expansión del golfo de Vizcaya. No existe una solución única con los datos disponibles. Carey, en su concepción primitiva del golfo de Vizcaya, supuso una apertura en tijera con un polo de rotación localizado en el extremo este del actual istmo pirenaico, con lo que la compresión pirenaica resultaba contemporánea. Pero la situación no era tan sencilla, puesto que la formación de la cordillera ocurrió, en lo esencial, más tarde que la apertura del golfo.

El equipo de Xavier Le Pichon, que en 1971 desarrolló uno de los primeros modelos de los Pirineos en el marco de la tectónica de placas, cifró el desplazamiento lateral de la península Ibérica en 350 km, acompañado por una rotación a favor de un eje de giro que situó en las proximidades de París. El modelo era atrayente, pero había que buscar en la cordillera emergida alguna estructura visible que fuera capaz de haber acomodado tan enorme traslación. Le Pichon y, posteriormente, P. Choukroune y M. Mattauer, argumentaron descubrirla en la falla Norpirenaica, falla vertical, que discurre a lo largo de gran parte de la cordillera; para estos autores habría desempeñado una función de falla transformante intracontinental.

La falla Norpirenaica resultaba una candidata favorable, ya que se trataba de una estructura de bastante longitud, las rocas que la circundaban tenían una intensa deformación, y mostraba signos de actividad durante el Mesozoico. Dicha actividad se deducía tanto de la distribución de las rocas sedimentarias de esa edad (de la paleogeografía), como del metamorfismo térmico, datado radiométricamente como cretácico (entre 90 y 100 millones de años), en una franja paralela a la falla.

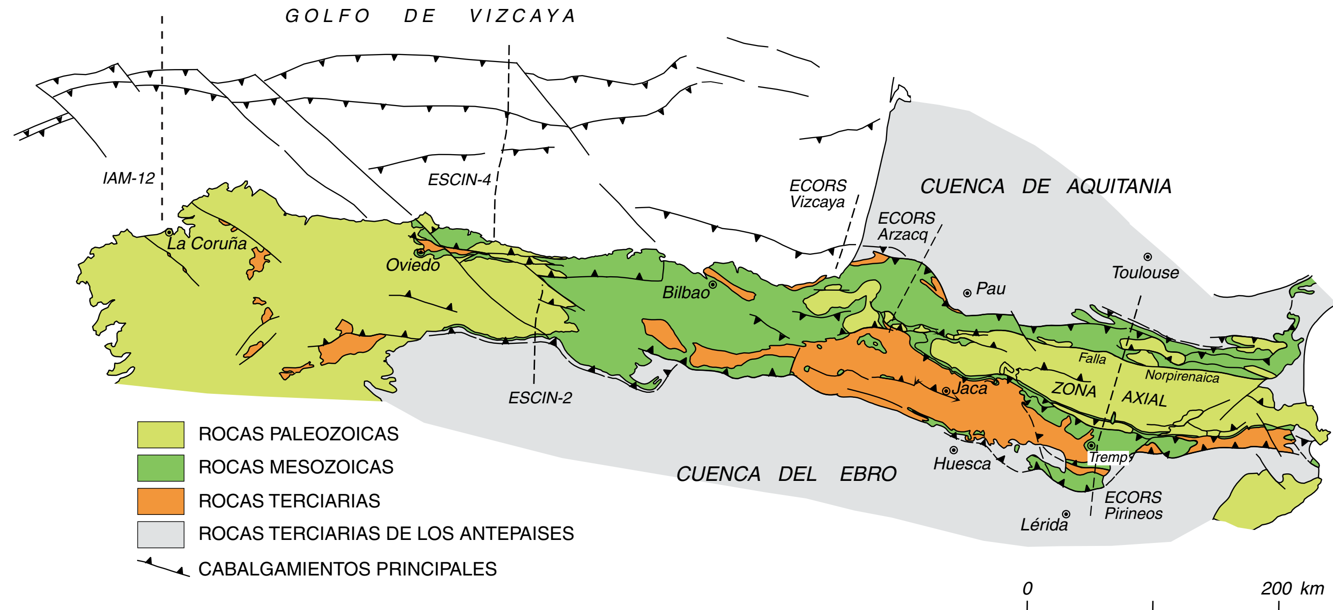
No obstante, otros geólogos han cuestionado esa atribución. Los mismos argumentos paleogeográficos y las comparaciones de las rocas a un lado y otro de la falla hacen difícil la traslación propuesta. A escala de afloramiento, la falla carece de criterios cinemáticos claros de movimiento lateral. Además, la falla Norpirenaica y sus atributos, bien caracterizados en los Pirineos



4. LOS ACONTECIMIENTOS GEOLOGICOS que han contribuido a moldear los Pirineos han tenido lugar en los últimos 150 millones de años. A modo de referencia, en letra cursiva se indican aquellos acontecimientos de rango global que trascienden el dominio pirenaico. La individualización de este dominio se remonta al Cretácico inferior, cuando los procesos de separación de placas y extensión de la corteza originaron fosas tectónicas en una ubicación coincidente y precursora de la futura cordillera. La forma y posición de las fallas normales originadas en ese estadio ejercerían un control fundamental en la arquitectura posterior de la cordillera, que se edificará en parte con el relleno de las fosas. En el Cretácico superior se suceden numerosos acontecimientos destacables, coincidentes con el intervalo de transición a la convergencia pirenaica. El golfo de Vizcaya se encuentra en expansión oceánica, y el adelgazamiento de la corteza continental en el actual istmo pirenaico llega al máximo. La formación de los primeros pliegues y cabalgamientos que comenzaron a crear la cadena de montañas coincide con los últimos estadios de expansión del golfo de Vizcaya. La orogenia llega a su paroxismo durante el Terciario.

orientales y centrales, no pueden trazarse a lo largo de toda la cordillera, sino que se pierden lateralmente antes de llegar al golfo de Vizcaya.

En consecuencia, la apertura oceánica del golfo de Vizcaya y la rotación de Iberia se produciría con una traslación lateral más moderada, quizá de unas decenas de kilómetros sola-



5. MAPA GEOLOGICO DE LA CORDILLERA PIRENAICA. En este tipo de mapas se representa la distribución cartográfica de los principales grupos litológicos, atendiendo a su edad, junto con la traza en superficie de las principales estructuras tectónicas —en trazo grueso: fallas y cabalgamientos—. Desde el punto de vista geológico, los Pirineos no se restringen al istmo entre España y Francia, sino que se extienden por el noreste hacia el Languedoc, y por el oeste a lo largo de la cornisa cantábrica hasta el norte de Galicia, tanto en tierra firme como en el margen continental. Las investigaciones de geología marina han revelado la existencia de importantes cabalgamientos y pliegues sumergidos bajo el mar Cantábrico. En líneas discontinuas se indica la ubicación de los perfiles de sísmica de reflexión profunda que se han realizado para investigar la estructura cortical de la cadena (programas ECORS, ESCI y IAM).



6. MALLOS DE RIGLOS, en Huesca. Están constituidos por conglomerados que se depositaron al pie de los relieves pirenaicos emergentes, de manera sincrónica con la deformación tectónica. Las rocas sedimentarias sintectónicas como los conglomerados de Riglos (*derecha*) son la fuente de información principal sobre la historia evolutiva de los Pirineos, puesto que permiten conocer la edad de la deformación y de la surrección del relieve. Desde el punto de vista estructural, las rocas calizas de la parte superior izquierda de la fotografía forman parte de los mantos de corrimiento frontales de la cordillera, mientras que los mallos conglomeráticos de la derecha pertenecen ya a la cuenca del Ebro (antepaís meridional). Durante el Terciario, a medida que se acumulaban, los conglomerados de Riglos se veían cabalgados de forma progresiva por los propios materiales calizos pirenaicos de cuya erosión se nutrían.

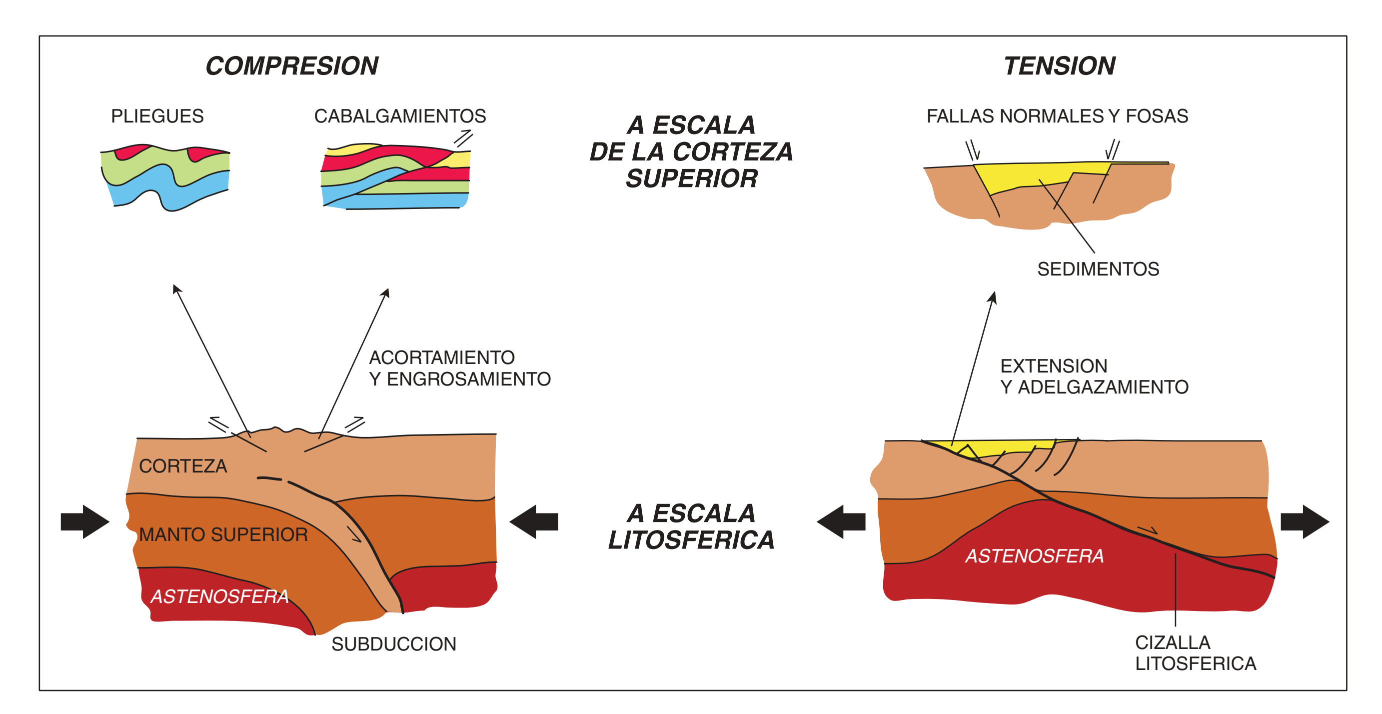
mente. La traslación pudo haber quedado plasmada no en una única estructura, sino a lo ancho del surco de fosas tectónicas cretácicas, resultado de un mecanismo combinado de extensión y deslizamiento lateral, es decir, de “transtensión”.

La componente extensiva, innegable a la luz del volumen y de la naturaleza marina de los sedimentos acumulados en las fosas, debió de adelgazar la corteza pirenaica antigua desde un espesor continental normal, próximo a 30 km, hasta poco más de 10 km, permitiendo el flujo de calor y el metamorfismo que hoy observamos.

En cualquier caso, estos acontecimientos terminaron entre la anomalía magnética 34 y la anomalía 33, dentro de los tiempos campanienses del Cretácico superior.

Aunque nos queden dudas sobre cómo llegó, sabemos dónde estaba la placa Ibérica hace poco más de 80 millones de años, justo en el momento de invertir su trayectoria y de comenzar su convergencia con la placa Eurasiática. Si hemos revisado hasta ahora la evolución anterior, pre-orogénica, del dominio pirenaico es por las profundas influencias de su herencia sobre la estructura actual de la cordillera. ¿Cuál fue la historia orogénica?

Las principales cadenas montañosas de la Tierra se han originado por fuerzas compresivas ejercidas cuando dos placas tectónicas se aproximan. Las fuerzas compresivas dan lugar a estructuras de acortamiento de las formaciones rocosas, que acomodan



7. LA LITOSFERA TERRESTRE es una entidad dinámica, sujeta a fuerzas tectónicas de tipo diverso. Una región puede estar sometida a fuerzas de tipo compresivo, cuando dos placas tectónicas se acercan, o de tipo distensivo (de tensión), cuando las placas divergen. Las fuerzas compresivas producen acortamiento horizontal y engrosamiento de la corteza, que se resuelve generalmente por pliegues y fallas contractivas o cabalgamientos, como los que edifican los Pirineos. La tensión se traduce en aumento de longitud y adelgazamiento de la corteza, procesos que se acomodan por las denominadas fallas normales o extensivas. A la escala de la litosfera, un límite de placas en convergencia puede resolverse con la subducción de una placa litosférica hacia el manto inferior semifluido (astenosfera). La extensión, por el contrario, se asocia a una remontada de la astenosfera, con un consiguiente flujo de calor hacia niveles relativamente poco profundos.

la reducción de espacio entre las placas en convergencia. A esta categoría de estructuras pertenecen los pliegues que contornean los estratos y las fallas inversas o cabalgamientos (fallas que provocan contracción de las sucesiones rocosas mediante la superposición o corrimiento de unas sobre otras). A gran escala, las estructuras compresivas causan el engrosamiento de la corteza terrestre, que se traduce en formación de tierras altas y montañas.

Las fuerzas compresivas entre las placas Ibérica y Eurasiática cerraron y levantaron la fosa marina que ocupaba la región pirenaica. Así se formó el cinturón montañoso actual, flanqueado por las tierras bajas periféricas de las cuencas de Aquitania y Ebro.

Si atendemos a la distribución de las estructuras tectónicas dentro de la cadena, distinguimos dos fajas principales, una septentrional y otra meridional. La faja septentrional, cabalgante hacia el norte sobre la cuenca de Aquitania, presenta pliegues y cabalgamientos internos volcados en esa dirección. En la faja meridional (más amplia, pues incluye un vasto macizo de rocas ígneas y metamórficas paleozoicas, la “zona axial”), las estructuras están volcadas hacia el sur, hacia la cuenca del Ebro.

Ambas mitades, que confieren a la cordillera pirenaica cierta simetría, la configuran en una cordillera de doble vergencia. La misma distribución de estructuras puede reconocerse también en la región más occidental, en la cornisa cantábrica, si bien allí la faja de vergencia septentrional no fue capaz de elevar por encima del nivel del mar un fondo que, al enlazar con la corteza oceánica del golfo de Vizcaya, era originalmente más profundo.

Superada la concepción autoctonista que dominó la geología pirenaica durante parte del siglo pasado, actualmente se atribuye una notable importancia a las estructuras de cabalgamiento y al acortamiento que han causado. Se cifra en decenas de kilómetros la reducción de espacio en el antiguo surco marino. Pero, ¿cómo podemos calcular la magnitud del acortamiento en una cordillera?

Se empieza por seleccionar una sección transversal a la cadena, perpendicular a los ejes de plegamiento y a la traza de los cabalgamientos principales (es decir, paralela a la dirección de movimiento o convergencia en la cordillera), en un segmento cuya geología se conozca bien. La geometría actual de las formaciones rocosas se representa entonces en un corte geológico.

Para calcular el acortamiento general conviene “deshacer” los efectos de la deformación, es decir, devolver a su posición y configuración iniciales las formaciones rocosas, desplegando los pliegues e invirtiendo el movimiento de las fallas o cabalgamientos. En este proceso podremos medir el acortamiento o traslación horizontal que ocurrió para llegar desde la situación original, previa a la deformación, hasta el estado actual.

Mediante la aplicación de tal procedimiento, en una transversal que pasa por el Pirineo leridano se ha calculado un acortamiento global que se cifra en 100-150 km, mientras que en la zona limítrofe entre el Pirineo aragonés y navarro el acortamiento se ha calculado en 80 km. La disminución del acortamiento de este a oeste es coherente con la reducción de anchura y de relieve de la cordillera que se observa en esa dirección. Estos valores cuantifican la convergencia de las placas Ibérica y Eurasiática. A partir de ellos, conociendo la duración de la orogenia,

podemos estimar la velocidad promedio a la que se acercaban las dos placas: entre 1,3 y 2,4 milímetros por año.

El tipo de criterio seguido para acotar la duración de la orogenia recuerda el utilizado para reconstruir la historia mesozoica: el registro de las rocas sedimentarias. Al extenderse y separarse fragmentos de la corteza terrestre, aparecen surcos o cuencas sedimentarias. Durante la elevación de una cordillera se produce también sedimentación en pequeñas cuencas intramontañosas o en la periferia de la cadena, en las tierras bajas que denominamos antepaíses. Las rocas sedimentarias que se originan presentan una signatura, una peculiar arquitectura de los estratos, que indica que su sedimentación se producía al mismo tiempo que el plegamiento (discordancias, acuñamiento de capas, variaciones bruscas de espesor o de granulometría del sedimento, etc.). En los Pirineos, las rocas que portan dicha signatura cubren el intervalo desde finales del Cretácico superior hasta el Mioceno inferior.

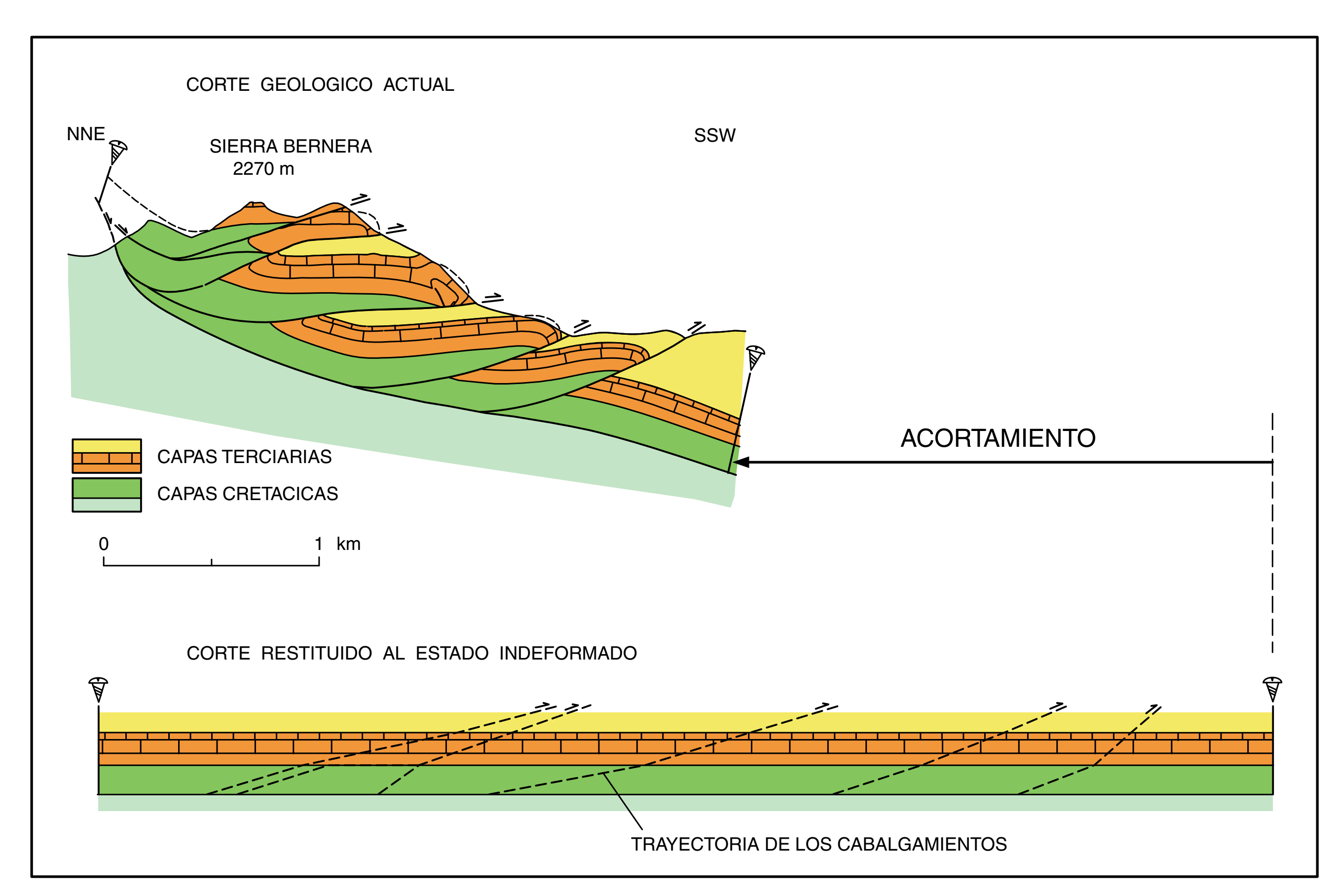
De la evolución orogénica de la cordillera podemos destacar varios hechos. Las estructuras compresivas más antiguas, reconocidas en los Pirineos centrales y orientales, son de edad Santoniense superior-Campaniense, edad a la que pertenece la anomalía magnética oceánica encontrada en el golfo de Vizcaya. El inicio de la convergencia fue, al menos durante un breve tiempo, contemporáneo a la expansión oceánica del golfo. Pero no podemos asegurar si en el margen continental al sur del golfo había entonces plegamiento o si la compresión empezó más tarde en esa transversal.

Por otra parte, de los datos del Pirineo emergido se conjetura que, cuando se inició la compresión, la cesión de la corteza y las primeras deformaciones se produjeron en la zona de mayor debilidad, es decir, en el eje del antiguo surco mesozoico al norte de los Pirineos, donde la corteza era más delgada y donde existían numerosas fallas formadas durante la etapa de divergencia. Muchas de las antiguas fallas normales se reactivaron como cabalgamientos, en un fenómeno de inversión tectónica.

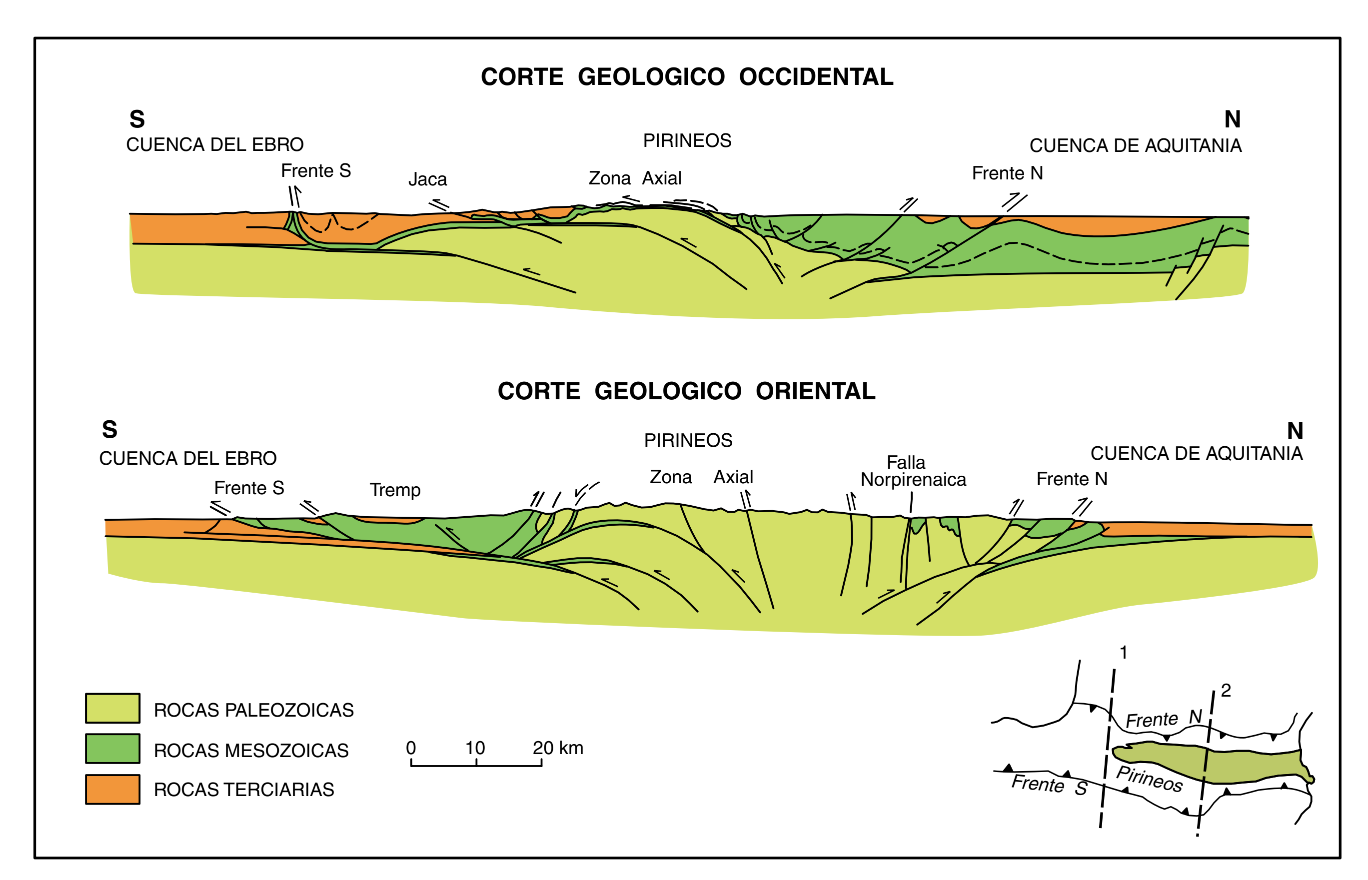
En esas etapas iniciales, la creación de relieve, modesta, se ceñía a la elevación progresiva del antiguo fondo marino. Los montes pirenaicos pasaron parte de su historia bajo el agua.

A medida que la convergencia de las placas progresaba, la cordillera creció en anchura y se vio involucrado el margen exterior al sur del antiguo surco, constituido por corteza ibérica espesa, poco alterada durante la extensión mesozoica. Acortar o apilar corteza rígida y espesa fue un proceso más costoso al que se asoció la creación principal de relieve y la retirada del mar de las tierras hoy emergidas.

El enterramiento y sellado de los últimos cabalgamientos y pliegues por



8. CORTE GEOLOGICO de un sector del Pirineo aragonés, al norte de Jaca. Un corte geológico es una sección vertical del terreno donde se representan la geometría y la distribución de las formaciones rocosas del subsuelo hasta una profundidad determinada. En éste queda reflejada la deformación que han sufrido las capas o estratos rocosos, originalmente horizontales, tras haber actuado los procesos tectónicos. La extensión lateral original que ocupaban las capas horizontales puede evaluarse "desplegando" la traza sinuosa de las capas y deshaciendo los desplazamientos causados por los planos de cabalgamiento. Comparando la longitud de las capas restituidas y la longitud que ocupan en el corte actual, entre dos líneas de referencia dadas (indicadas por los tornillos), podemos calcular el acortamiento experimentado para pasar de un estadio a otro, un reflejo de la convergencia de las placas tectónicas.



9. DOS CORTES GEOLOGICOS que atraviesan la cordillera pirenaica completa a través de su parte central. La sección oriental discurre entre las localidades de Balaguer y Toulouse, pasando por los valles de Noguera Pallaresa y de Salau. La sección occidental discurre un poco al oeste de la localidad de Jaca, por los valles de Ansó, Belagua, Arette y Oloron, terminando al oeste de Pau. Estos cortes abarcan únicamente la parte superior de la corteza, sector cuya estructura podemos deducir con razonable fiabilidad a partir de las observaciones de superficie y de sondeos, y se basan en los trabajos de numerosos geólogos de ambos lados de los Pirineos. En las dos secciones se aprecia la relativa simetría estructural de la cordillera, con una parte septentrional en la que los cabalgamientos están dirigidos hacia el norte, y una parte meridional en la que están dirigidos hacia el sur. En la parte topográficamente más alta de la cordillera (Zona Axial), el apilamiento de mantos cabalgantes y su subsecuente erosión ha hecho desaparecer las rocas sedimentarias mesozoicas que cubrían este territorio, exhumando así las rocas paleozoicas. Estas últimas, previamente afectadas por la orogenia herciniana, de finales del Paleozoico, están constituidas en gran parte por materiales de origen ígneo (granitos) y metamórfico. La magnitud del acortamiento orogénico calculado en estas secciones de la cordillera es mayor en la sección oriental (100 o 150 km, según diferentes investigadores) que en la occidental (unos 80 km), en consonancia con su mayor elevación topográfica y grado de exhumación.

los sedimentos del Mioceno inferior y medio, tal como se observa en las Sierras Exteriores surpirenaicas, representa el momento en que Iberia quedó definitivamente unida a Eurasia, a partir del cual la trayectoria de ambas devino indisociable.

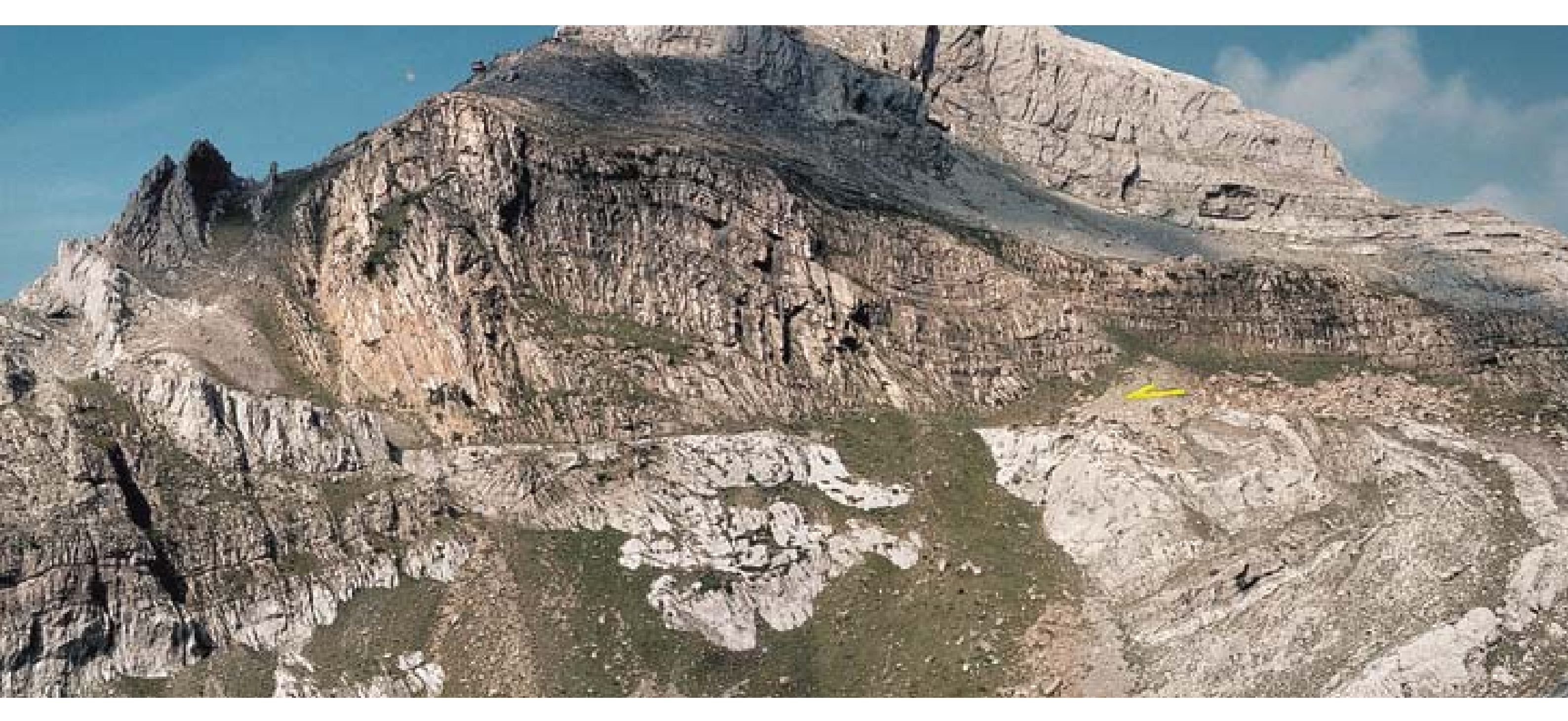
A través de las observaciones de geología de superficie, y con la ayuda de sondeos, hemos llegado a un grado razonable de conocimiento de la estructura interna de los primeros kilómetros de la corteza pirenaica y hemos podido evaluar la magnitud del acortamiento orogénico en estos niveles.

Ahora bien, para mantener el equilibrio de masas durante la orogenia, han de ser semejantes el acortamiento y la reducción de espacio en todos los niveles de la corteza, más allá de donde tenemos observación directa. Mas, ¿cómo se resuelve la estructura en los niveles profundos?

Por sí solas, las observaciones de superficie no bastan para hallar la solución. Pero si les sumamos las investigaciones geofísicas del subsuelo podemos obtener un modelo litosférico de la cordillera. Las investigaciones sobre la tectónica profunda se apoyan en la medida de la gravedad de la tierra (gravimetría) y en la propagación de ondas sísmicas (naturales o generadas por explosiones controladas).

De las variaciones de la gravedad entre un punto y otro inferimos contrastes de densidad en la litosfera de una región a otra. Algunas de las variaciones o anomalías gravimétricas son fruto de factores cercanos a la superficie. Cuencas ocupadas por materiales sedimentarios poco densos o cuerpos volcánicos someros de alta densidad serían ejemplos típicos. Sin embargo, otras anomalías reflejan factores más profundos, ligados al límite entre la corteza y el manto. En la zona axial de los Pirineos se detecta una manifiesta anomalía negativa de la gravedad, que trasciende la escala local y refleja el engrosamiento de la corteza bajo la cordillera. Puesto que la densidad de la corteza es menor que la del manto, cualquier prolongación de la corteza dentro del manto se traducirá en un descenso de la gravedad en aquella región.

Como cabía esperar de los fenómenos de convergencia y acortamiento orogénico, tenemos indicios fiables



10. LOS CABALGAMIENTOS o fallas contractivas son elementos fundamentales de la estructura de la cordillera pirenaica. Esta imagen, tomada en las Sierras Interiores altoaragonesas al norte de Hecho, muestra uno de estos cabalgamientos, que aparece como una superficie de contacto nítida mediante la cual areniscas de edad cretácica (*con tonalidad marrón*) han montado —"cabalgado"— por encima de calizas de edad terciaria (*con tonalidad blanca*), invirtiendo así el orden normal de la sucesión estratigráfica. La flecha amarilla indica la dirección de avance de la masa cabalgante o manto de corrimiento.

de que la corteza pirenaica es más gruesa que la de las regiones llanas circundantes.

¿Hasta qué punto es más gruesa? ¿Qué forma adquiere esa "raíz" bajo la cordillera? La solución nos vendrá dada por la refracción y la reflexión de ondas sísmicas provocadas en el subsuelo. La refracción de las ondas sísmicas permite dividir la litosfera en capas dotadas de diferentes propiedades físicas, en las que las ondas se propagan a distinta velocidad. Así, el límite entre la corteza y el manto (discontinuidad de Mohorovicic o "Moho") está definido por una superficie refractante entre una capa donde la velocidad de las ondas *P* es 6-6,5 km/s (corteza) y otra donde la velocidad aumenta a 8 km/s (manto).

A principios de los años ochenta, J. Gallart y M. Daignières analizaron datos de refracción de ondas sísmicas causadas por explosiones controladas en los Pirineos. Y cifraron el engrosamiento cortical bajo la cadena: del espesor medio de 30-33 km de la corteza ibérica fuera de la cordillera se pasaba a más de 45 km bajo las altas cumbres de la misma. Dedujeron, además, que el espesor cortical caía de nuevo, bajo la vertiente norte de los Pirineos, a 30 km.

Esa brusca transición parecía hallarse bajo la falla Norpirenaica. Se esbozó así un modelo de la cadena en el que la falla Norpirenaica constituía una fractura vertical maestra que atravesaba toda la corteza, separando dos dominios con espesor cortical diferente. Enlazando con la importancia que muchos autores habían concedido a la falla durante la separación y rotación de placas en el Mesozoico, la misma estructura adquiría una función preponderante en la orogenia pirenaica.

Con tal modelo, sin embargo, resultaba difícil equilibrar el acortamiento orogénico entre la corteza superior y la corteza inferior. En efecto, no bastaba una fractura vertical en profundidad para provocar, por sí sola, acortamiento alguno; por tanto, había que suponer una importante magnitud de acortamiento dúctil y homogéneo en los niveles medios e inferiores de la corteza, al menos del mismo orden que el asignado a la traslación de los mantos de corrimiento de la corteza superior.

La siguiente generación de modelos geotectónicos de los Pirineos brotó de la realización de perfiles de sísmica de reflexión. Los principios en los que se basa el método sísmico de reflexión son semejantes a los del método de refracción, con la salvedad de que, en este caso, se analizan las reflexiones de las ondas, tal y como se detectan en una serie de puntos de registro o geófonos dispersos a partir de un punto de explosión móvil.

Tras un adecuado tratamiento de las señales recibidas, se obtiene una sección vertical de la corteza con las trazas de los principales niveles o superficies reflectoras. Luego, se asocia cada traza reflectora a una capa o estructura tectónica particular; de ese modo, algunas reflexiones representan estratos, otras superficies de fractura, cabalgamientos e incluso la discontinuidad Moho.

La ejecución de un perfil profundo de reflexión requiere el concurso de varias instituciones o países. El primer perfil sísmico (perfil ECORS-Pirineos), fruto de un programa de cooperación hispano-francés, se elaboró en la segunda mitad de los años ochenta, atravesando la cordillera desde Toulouse a Balaguer. Ahora disponemos ya de seis perfiles que atraviesan el dominio pirenaico-cantábrico y el golfo de Vizcaya.

Los perfiles de sísmica de reflexión pirenaicos, además de precisar valiosos detalles de la estructura interna y del espesor de la corteza, han revelado que la falla Norpirenaica

no atraviesa toda la corteza (está interrumpida por el cabalgamiento frontal norpirenaico) y que la estructura cortical profunda es asimétrica. La corteza ibérica tiende a sumergirse hacia el norte bajo la europea, que mantiene una profundidad al Moho constante. Los perfiles han mostrado que una placa ha montado sobre la otra.

Los resultados de los perfiles deben servirnos para construir nuevos cortes geológicos, que representen esta vez ya toda la corteza y el manto superior. Conviene saber, empero, que los perfiles de reflexión no son un recurso infalible. No hemos logrado la resolución inequívoca de la estructura profunda de la parte central de la cadena; y se discute sobre la forma precisa con que la placa Eurasiática se superpone a la Ibérica.

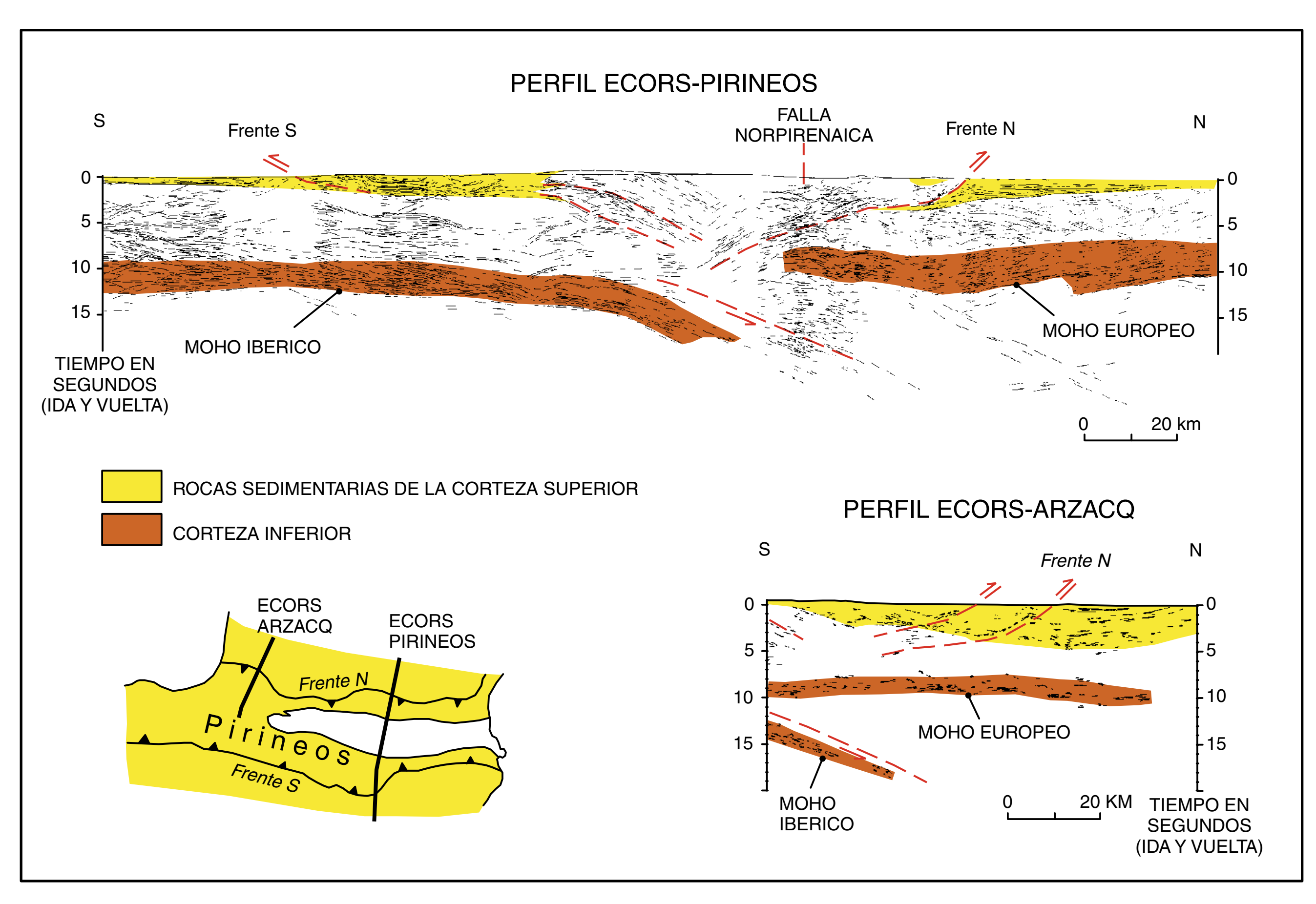
Así, en el análisis del perfil ECORS-Pirineos, P. Choukroune, F. Roure y demás integrantes del equipo ECORS han llegado a la conclusión de que la superposición entre las dos placas es moderada; además, resuelven gran parte del acortamiento en profundidad mediante numerosos cabalgamientos intracorticales que afectan a la corteza inferior de ambas placas.

De esa explicación discrepan J. A. Muñoz, X. Berastegui y colaboradores, en cuya opinión la convergencia entre la placa Eurasiática y la Ibérica se ha traducido en una subducción continental de la segunda, hasta una profundidad superior a la detectada por el perfil.

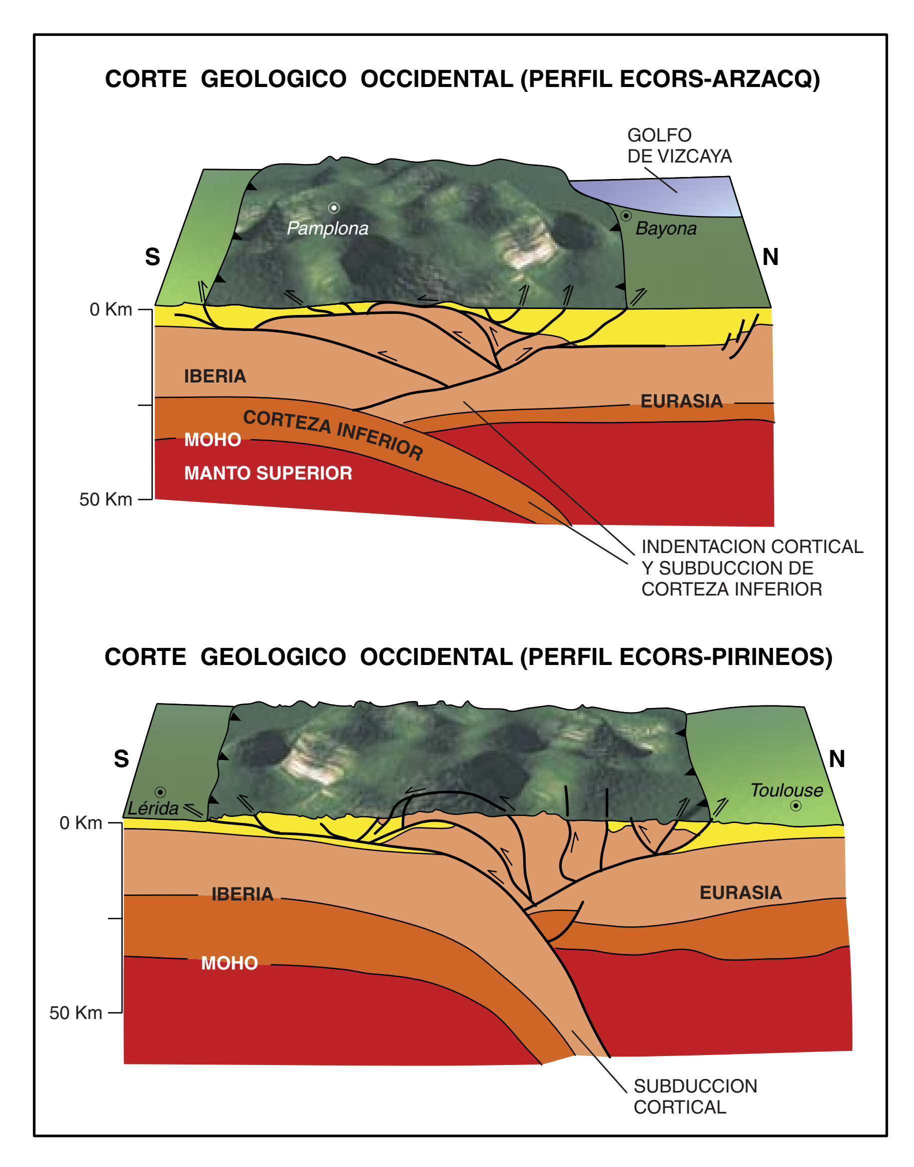
Otro perfil sísmico profundo disparado a finales de los ochenta, el perfil ECORS-Arzacq, podría arrojar más luz al interior de la tierra. Un repaso de la distribución de los niveles reflectores en dicho perfil me llevó a la conclusión de que podía reconocerse corteza ibérica adentrándose hacia el manto hasta una profundidad de al menos 60 km.

El perfil ECORS-Arzacq revelaba más detalles de la geometría del engrosamiento cortical bajo la cordillera. A raíz de la colisión entre placas, la corteza europea se había introducido como una cuña en la ibérica, doblando así el espesor original. La parte inferior desgajada de ésta se había subducido hacia el manto, mientras que la superior quedó deformada en el prisma orogénico supracortical.

La teoría de la tectónica de placas predice que, cuando una placa continental converge con una placa



11. PARA LA INVESTIGACION de la estructura profunda de la corteza pirenaica se utilizan técnicas geofísicas como la sísmica de reflexión, que se basa en la propagación y en las reflexiones en el subsuelo de ondas sísmicas artificiales generadas por explosiones controladas. Con los datos registrados en una serie de geófonos se construye una sección vertical del terreno (perfil sísmico), en la que las líneas cortas representan la traza de los principales niveles o superficies reflectoras bajo el suelo. Estas trazas deben ser interpretadas y atribuidas a elementos geológicos particulares (estratos, contactos litológicos, cabalgamientos, etc.). La figura reproduce dos perfiles realizados en los Pirineos, cuya traza coincide aproximadamente con la de los cortes someros de la figura 7. En ambos perfiles quedan bien expresados los rasgos fundamentales de la estructura cortical, y se individualizan claramente las cortezas ibérica y europea, con la discontinuidad de Mohorovicic (Moho) en la base. Uno de los resultados más notables de los perfiles es la representación de la inmersión de la placa Ibérica hacia el norte, por debajo de la placa Eurasiática. Este hecho manifiesta los efectos del acortamiento pirenaico a gran profundidad. La escala vertical no está en unidades de longitud, sino de tiempo de ida y vuelta de las ondas sísmicas reflejadas.



12. ESTRUCTURA TECTONICA a escala cortical de los Pirineos, basada en las investigaciones de superficie y en los datos geofísicos del subsuelo profundo. El corte oriental, debido a J. A. Muñoz, X. Berastegui y colaboradores, se apoya en el perfil ECORS-Pirineos, el primero en realizarse. En esta hipótesis se contempla una subducción de la corteza ibérica hacia el norte bajo la eurasiática, fruto de la convergencia entre ambas placas. Para elaborar la sección occidental (situada 160 kilómetros más al oeste), me basé en el perfil de reflexión ECORS-Arzacq y en datos de sísmica de refracción de zonas más al sur. Los datos disponibles llevaron a la conclusión de que la corteza eurasiática se había introducido como una cuña en la corteza ibérica, y que únicamente la parte inferior de esta última había subducido hacia el manto.

oceánica, la segunda se subduce hacia el manto bajo la primera, en razón de su mayor densidad. Pero si se acercan dos placas continentales, prosigue la teoría, entonces no hay subducción, pues la corteza continental granítica es mucho menos densa que el manto y su "flotabilidad" le impide adentrarse en él. Todo apunta a que los Pirineos vulneran esa regla. Podemos descartar la antigua existencia de un segmento de corteza oceánica —hoy consumido— en el dominio pirenaico ahora emergido, ya que, como corrobora el perfil sísmico ECORS-Vizcaya, la corteza oceánica del golfo de Vizcaya no pasaba del meridiano de Asturias occidental. Por tanto, la porción de corteza subducida bajo los Pirineos ha de ser enteramente continental.

Ahora bien, hay factores que podrían quitar hierro a esa aparente contradicción con la teoría de la tectónica de placas. En primer lugar, sólo ha subducido la corteza inferior —más densa, a la luz de la distribución de las velocidades de las ondas sísmicas—, mientras que las cortezas media y superior se han acortado mediante la indentación de la cuña europea y mediante el prisma orogénico de la corteza superior. En segundo lugar, al hundirse material cortical a profundidades mantélicas, cabe presumir que se viera sometido a unas condiciones de presión y temperatura elevadas, capaces de provocar un metamorfismo intenso en las rocas que incrementara su densidad (tenemos constancia de tales transformaciones mineralógicas y microestructurales gracias al afloramiento de este tipo de rocas —denominadas eclogitas— en otras regiones del globo).

Hasta aquí nos hemos ocupado del segmento ístmico de los Pirineos. ¿Cuál es la situación en el sector cantábrico? Tras el descubrimiento de un sistema de cabalgamientos de estilo "pirenaico" en la plataforma y talud submarinos, los equipos de Le Pichon y de G. Boillot propusieron que, durante la etapa compresiva del Terciario, una parte de la corteza oceánica del golfo de Vizcaya había subducido hacia el sur bajo el margen continental noribérico. La subducción debía haber sido limitada, puesto que la región carece de algunas de las características distintivas de las zonas de subducción océano/continente; en especial, de magmatismo (arcos de islas, cinturones volcánicos, etc.), que no falta en los márgenes activos actuales de los Andes y del Pacífico occidental, por citar dos ejemplos típicos.

Sin embargo, los perfiles sísmicos del programa español ESCI-N revelaron que la estructura profunda de la corteza continental cantábrica es muy semejante a la de los Pirineos centrales. Bajo los Picos de Europa, existe también un fragmento de corteza continental que se sumerge hacia el norte hasta profundidades mantélicas, incluso en esa región que originalmente estaba enfrentada a corteza oceánica. Bajo el mar, los perfiles ESCI-N han corroborado la existencia de cabalgamientos en el margen continental, que convergen en un nivel de despegue basal. No puede confirmarse si este despegue basal corresponde a un verdadero plano de subducción situado sobre corteza oceánica, cuya extensión allende la franja de anomalía magnética 34, situada bastante al norte de los cabalgamientos, se desconoce. Las estructuras cabalgantes que hoy observamos podrían

ANTONIO TEIXELL enseña geotectónica en la Universidad Autónoma de Barcelona. Ha trabajado, adscrito al Instituto Geológico y Minero de España y a la universidad, en temas de investigación de geología estructural y de tectónica-sedimentación en diversas cordilleras de Europa, de Norteamérica y del norte de Africa. Lleva más de 15 años estudiando la cordillera Pirenaica.

representar únicamente deformaciones intracorticales del antiguo margen continental pasivo.

Todo esto se refiere a unos acontecimientos que concluyeron hace unos 20 millones de años. La convergencia entre las placas Ibérica y Eurasiática cesó. No hay duda de que los Pirineos se están erosionando, pero podemos matizar si han dejado o no de crecer. A este respecto, la existencia de la raíz de corteza profunda que se adentra hacia el manto, bajo la cordillera, tiene unas consecuencias importantes.

Por el estudio de la propagación de las ondas de los terremotos se sabe que la astenosfera, capa semifluida y densa, subyace bajo la litosfera. Según su altura topográfica, las regiones del globo se encuentran en equilibrio isostático, flotando sobre la astenosfera; se trata del principio de Arquímedes aplicado a nuestro planeta. Al igual que el ascenso que se produce al aligerar de carga un buque, al erosionarse una tierra alta la masa que se pierde se traduce en un levantamiento masivo de la corteza que la subyace.

¿Significa eso que los Pirineos son cada vez más altos? No, si los consideramos en conjunto, ya que la altura media de la cadena va disminuyendo, pero algunas cumbres, de erosión ineficaz, podrían ganar altura. En algunas zonas del Pirineo francés se han medido elevaciones (desnivelamientos) recientes de alrededor de 1 mm por año. En términos de evolución del relieve, los Pirineos constituyen una cordillera joven.

Por otra parte, el que los Pirineos puedan atravesar una relativa placidez tectónica, no significa que sea una región sismológicamente inactiva. La región sufre frecuentes terremotos, casi siempre de baja intensidad, salpicados de sacudidas violentas. El 13 de agosto de 1967, un temblor que azotó la localidad bearnesa de Arette, una de las zonas de mayor actividad sísmica, alcanzó una magnitud de 5,3. Los terremotos más destructores de los que se tiene documentación histórica afectaron al Pirineo catalán, en el siglo XV (1427 en Olot y 1428 en Queralbs). No puede decirse que los Pirineos constituyan una zona de alto riesgo, pero el caso de Arette nos puso de nuevo sobre aviso. Se conocen mal todavía los mecanismos focales de los terremotos pirenaicos, aunque se sospecha que los seísmos podrían derivar de la reactivación de algunas fallas antiguas producidas durante la etapa orogénica.

La investigación geológica de los Pirineos seguirá deparando sorpresas, con la introducción de nuevos enfoques y la aplicación de técnicas refinadas. Entre las últimas incorporadas, está la medición de la conductividad eléctrica a través de la litosfera, que ha permitido detectar una zona de conductividad anómalamente alta bajo la parte axial de la cadena, entre 30 y 80 km de profundidad. Para J. M. Pous y colaboradores, esa conductividad refleja la presencia de fluidos que impregnan las rocas, magma derivado de la fusión parcial de la raíz cortical pirenaica. De ser ciertas estas atribuciones, algún día el magma podría buscar su camino hasta la superficie. Esto parece lejano todavía, pero si algún día la región pirenaica inicia un nuevo ciclo de fracturación y reapertura, entonces, convendrá estar al acecho.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ECORS PYRENEAN DEEP SEISMIC PROFILE REFLECTION DATA AND THE OVERALL STRUCTURE OF AN OROGENIC BELT. P. Choukroune y Equipo ECORS, en *Tectonics*, volumen 8, págs. 23-39, 1989.

TALL GEOLOGIC DEL PIRINEU CENTRAL 1:200.000. X. Berastegui, M. Losantos, J. A. Muñoz y C. Puigdefàbregas, Ed. Servei Geològic de Catalunya, Institut Cartogràfic de Catalunya, 1993.

SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOPHYSIQUE DES PYRENEES. A. Barnolas y J. C. Chiron, Ed. BRGM-ITGE, Orléans-Madrid, 1996.

CRUSTAL STRUCTURE AND OROGENIC MATERIAL BUDGET IN THE WEST CENTRAL PYRENEES. A. Teixell, en *Tectonics*, volumen 17, páginas 395-406, 1998.

El gran colisionador de





El Gran Colisionador de Hadrones será un acelerador de partículas de energía y complejidad sin precedentes. Personas e instituciones de muchos países colaboran para descubrir un nuevo estrato exótico de la realidad

Chris Llewellyn Smith

Cuando dos protones viajan al 99,999999 por ciento de la velocidad de la luz y chocan frontalmente la consiguiente explosión subatómica pone en juego una energía de 14 billones de electronvoltios (TeV). Esta energía, que representa 14.000 veces la que almacena un protón en reposo, se distribuye entre las partículas más pequeñas que forman cada protón: los quarks y los gluones que los mantienen unidos. En la mayoría de las colisiones la energía se desaprovecha, porque los quarks y gluones individuales chocan lateralmente, desprendiendo un chorro tangencial de partículas usuales, catalogadas y analizadas desde hace ya tiempo. Pero hay ocasiones en las que dos quarks chocan frontalmente con una energía de 2 TeV o más. Los físicos están seguros de que la naturaleza conserva nuevos ases en la manga, que habrá de manifestar en tales colisiones. Quizá se trate de una partícula exótica conocida como el bosón de Higgs. Tal vez sean indicios de un efecto milagroso denominado supersimetría y hasta puede que algo inesperado ponga patas arriba la física teórica de partículas.

La última vez que se produjo en gran escala una colisión de quarks tan violenta fue hace miles de millones de años, durante el primer picosegundo (10^{-12} segundos) siguiente a la gran explosión ("big bang"), pero volverán a ocurrir de nuevo hacia el año 2005, en un túnel circular existente bajo los campos franco-suizos cerca de Ginebra. Esa es la fecha en que miles de científicos e ingenieros de docenas de países esperan acabar de construir los gigantescos detectores para el Gran Colisionador de Hadrones ("Large Hadron Collider", LHC) y empezar los experimentos. Este proyecto, tan amplio y de tanta ambición técnica, está coordinado por el CERN (el Laboratorio Europeo de física de partículas), que tiene la importante responsabilidad de construir el propio acelerador, y se encuentra en plena marcha.

El LHC tendrá unas siete veces la energía del colisionador Tevatron del Fermi National Accelerator Laboratory de Batavia, Illinois, instalación en la que se descubrió el tan buscado quark "top" en experimentos realizados entre los años 1992 y 1995 [*véase* "El descubrimiento del quark cima" por Tony M. Liss y Paul L. Tipton; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 1997]. El LHC alcanzará estas energías sin precedentes a pesar de haberse construido dentro de un túnel de 27 kilómetros ya existente. Dicho túnel alberga el "Large Electron-Positron Collider" (LEP) del CERN, que se ha utilizado para realizar medidas de precisión para comprobar la teoría de la física de partículas a energías del orden del uno por ciento de la energía del LHC. Usando el túnel del LEP, el LHC evita los problemas que implica y los grandes gastos que comporta la construcción de un túnel nuevo y mayor, así como la de los cuatro aceleradores menores de inyección y los correspondientes servicios complementarios. Pero adaptar las trayecto-

1. A CABALLO SOBRE LA FRONTERA FRANCO-SUIZA, se indica en amarillo la localización del túnel de 27 kilómetros que albergará el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), situado a cien metros bajo el suelo. Los círculos más pequeños señalan las posiciones de las cavernas donde se hallan los detectores y los equipos auxiliares.

rias de los haces de protones de 7 TeV a las curvas del viejo túnel requerirá campos magnéticos más intensos que los que ningún acelerador haya usado hasta ahora. Tales campos serán producidos por 1232 imanes de 15 metros de largo instalados a lo largo del 85 por ciento de la circunferencia del túnel. Los imanes serán alimentados por cables superconductores que soportarán corrientes de 12.000 amperios y estarán enfriados por helio superfluido a una temperatura de –271 grados Celsius, dos grados por encima del cero absoluto.

Para realizar experimentos de física interesantes no basta con disponer de protones de alta energía. Lo que cuenta es la energía de las colisiones entre los constituyentes de los protones, los quarks y los gluones, que se reparten la energía de los protones de manera fluctuante. En el LHC chocarán haces de protones de intensidades sin precedentes para aumentar el número de colisiones raras entre quarks y gluones que tengan fracciones inusualmente elevadas de la energía de sus protones progenitores. La intensidad, o "luminosidad", del LHC será 100 veces mayor que la de los colisionadores precedentes, como el Tevatron, y 10 veces la del cancelado Supercolisionador Superconductor (SSC). El SSC habría sido un competidor directo del LHC, que hubiera hecho colisionar haces de protones de 20 TeV en un túnel de 87 kilómetros de circunferencia alrededor de Waxahachie, Texas. En relación al SSC, la mayor intensidad del LHC compensará ampliamente la menor energía del haz, pero hará que los experimentos sean mucho más difíciles. Intensidades tan elevadas provocarán además otros problemas, como el caos en las órbitas de los haces, que habrá que superar para que los haces se mantengan estables y bien enfocados.

En cuatro puntos a lo largo del anillo del LHC se producirán mil millones de colisiones por segundo, cada una de las cuales producirá unas 100 partículas secundarias. Enormes detectores —el mayor de los cuales tiene casi la altura de un edificio de seis pisos—, formados por miles de complicados componentes, registrarán todos los residuos. Elaborados algoritmos computacionales tendrán que escrutar toda esta avalancha de datos instantáneamente para decidir cuáles sean los que merezcan ser registrados para proceder posteriormente a su completo análisis (probablemente serán entre 10 y 100 por segundo).



2. LA CADENA DE PRUEBAS del imán superconductor colocada en el hangar de ensamblaje; 1232 de tales imanes curvarán la trayectoria de los dos haces de protones para que sigan la curva del túnel del acelerador.

Cuestiones pendientes

A medida que se estudia la naturaleza con sondas de mayor energía, se profundiza en la estructura de la materia a escalas de distancia cada vez menores. Los experimentos realizados con los aceleradores existentes la han explorado hasta una trillonésima de metro (10^{-18} metros). Los proyectiles del LHC penetrarán aún más en el corazón de la materia, hasta 10^{-19} metros. Bastaría esto para estimular los apetitos científicos, pero ya se ha dado la señal de salida para una nueva carrera investigadora, pues hay razones de peso que indican que en este nuevo dominio, que los datos del LHC esclarecerán, deberían encontrarse las respuestas a cuestiones importantes.

Los físicos de partículas han establecido en los 30 últimos años un marco relativamente coherente —el modelo estándar—, que describe con éxito la estructura de la materia hasta unos 10^{-18} metros. El modelo estándar (*véase el recuadro*) caracteriza sucintamente todos los constituyentes conocidos de la materia y tres de las cuatro fuerzas que controlan su comportamiento. Los constituyentes de la materia son seis partículas llamadas leptones y otras seis llamadas quarks. Una de las fuerzas, conocida como la fuerza fuerte, no actúa más que sobre los quarks, ligándolos para formar centenares de partículas a las que se llama hadrones. El protón y el neutrón son hadrones; un efecto residual de la fuerza fuerte los une para formar los núcleos atómicos. Las otras dos fuerzas son el electromagnetismo y la fuerza débil; ésta sólo opera a distancias muy cortas, pero es responsable de la desintegración radiactiva beta y es esencial para el ciclo de combustión del Sol. El modelo estándar explica elegantemente estas dos fuerzas mediante la fuerza "unificada" electrodébil, que relaciona sus propiedades a pesar de tener una apariencia muy distinta.

Más de dos decenas de físicos han ganado premios Nobel por sus contribuciones al modelo estándar, desde la teoría de la electrodinámica cuántica (el premio de 1965) hasta los trabajos teóricos de Gerardus 't Hooft y Martinus J. G. Veltman (1999), pasando por el descubrimiento del neutrino y el de la partícula tau (1995). Pero aunque se trate de un gran logro científico, confirmado por una plétora de experimentos (algunos de extraordinaria precisión), el modelo estándar tiene algunos defectos serios.

Primero, no incluye de manera consistente la teoría de Albert Einstein sobre las propiedades del espaciotiempo y sus relaciones con la materia. Esta teoría, la relatividad general, proporciona una bella descripción de la cuarta fuerza, la gravedad, que está muy bien verificada experimentalmente. La dificultad es que el modelo estándar es una teoría plenamente mecánico-cuántica, mientras que la relatividad general no lo es y, por tanto, sus predicciones han de fallar a escalas muy pequeñas (muy alejadas del dominio en que se ha

CHRIS LLEWELLYN SMITH es presidente y rector del University College London. Ha estado en el Instituto Lebedev de Moscú, en el CERN, cerca de Ginebra, y en el Stanford Linear Accelerator Center en California antes de retornar a la Universidad de Oxford, donde pasó la mayor parte de su carrera como físico teórico. Entre 1994 y 1998 fue director general del CERN, cuando se aprobó el proyecto del Large Hadron Collider y se negociaron nuevas relaciones con países no miembros, incluyendo Japón y los E.U.A., que participarán en el proyecto.

comprobado). La ausencia de una descripción mecánico-cuántica de la gravedad hace que el modelo estándar sea lógicamente incompleto.

En segundo lugar, aunque sus sencillas ecuaciones describan con éxito un gran abanico de datos, el modelo estándar contiene muchos extremos aparentemente arbitrarios. Es demasiado barroco, demasiado bizantino, para ser toda la historia. Por ejemplo, no indica por qué tenga que haber seis quarks y seis leptones en vez de, digamos, dos o cuatro. Tampoco explica por qué el número de leptones y el de quarks sean iguales. ¿Es una pura coincidencia? Sobre el papel pueden construirse teorías que dan respuestas y explicaciones mejores y en las que hay profundas conexiones entre los quarks y los leptones, pero no sabemos cuál de estas teorías sea la correcta, de serlo alguna.

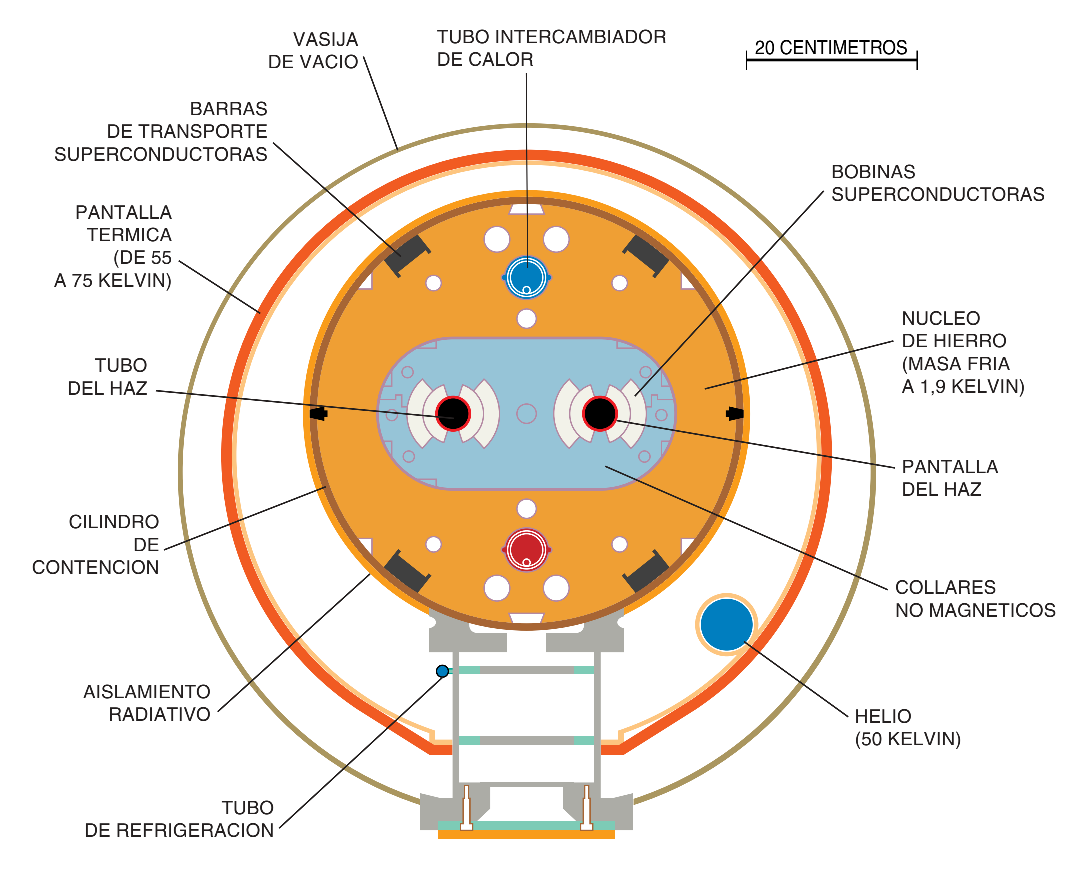
Tercero, el modelo estándar tiene un elemento inacabado y no comprobado. No se trata de ningún detalle menor, sino de un componente central: un mecanismo para generar las masas observadas de las partículas. Las masas de las partículas tienen una gran importancia. Por ejemplo, alterando la masa del electrón cambiaríamos toda la química; las masas de los neutrinos afectan a la expansión del universo. (Las masas de los neutrinos serían, como mucho, de unas millonésimas de la masa del electrón, pero experimentos recientes indican que es probable que su valor no sea nulo. *(Véase* "Detección de la masa de los neutrinos," por Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoji Totsuka; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1999.)

El mecanismo de Higgs

Los físicos consideran que las masas de las partículas resultan de sus interacciones con un campo que ocupa todo el universo; cuanto más fuertemente se relaciona una partícula con el campo, más masa tiene. Pero la naturaleza de este campo permanece desconocida. Podría tratarse de un nuevo campo elemental, conocido como el campo de Higgs, en honor del físico británico Peter Higgs. Otra posibilidad es que no fuese un objeto elemental, sino que estuviese formado por nuevas partículas ("techniquarks") fuertemente ligadas por una nueva fuerza ("technicolor"). Incluso si se tratase de un campo elemental, el asunto del Higgs permite muchas variaciones: ¿cuántos campos de Higgs existen? ¿cuáles son sus propiedades concretas?

Pero se sabe con certeza casi matemática que, sea cuál sea el mecanismo responsable, tiene que producir nuevos fenómenos en el rango de energías del LHC, tales como partículas de Higgs observables (que serían una manifestación de las ondulaciones del campo subyacente) o technipartículas. El objetivo principal del diseño del LHC es, por tanto, descubrir estos fenómenos y esclarecer la naturaleza del mecanismo de generación de la masa.

Los experimentos del LHC también tendrán que ver con otros nuevos fenómenos que podrían confirmar una u otra de las teorías especulativas que amplían o completan el modelo estándar. Para señalar tan sólo un ejemplo particularmente interesante, mencionemos que se acepta ampliamente que la teoría más completa tendrá que incorporar una "supersimetría". La supersimetría incrementaría considerablemente el conjunto de relaciones entre las partículas elementales y las fuerzas. La llamada supersimetría local incluye además de manera automática la gravedad. E inversamente, la única teoría conocida que podría combinar con éxito la relatividad general y la mecánica cuántica (la teoría de cuerdas) requiere la supersi-



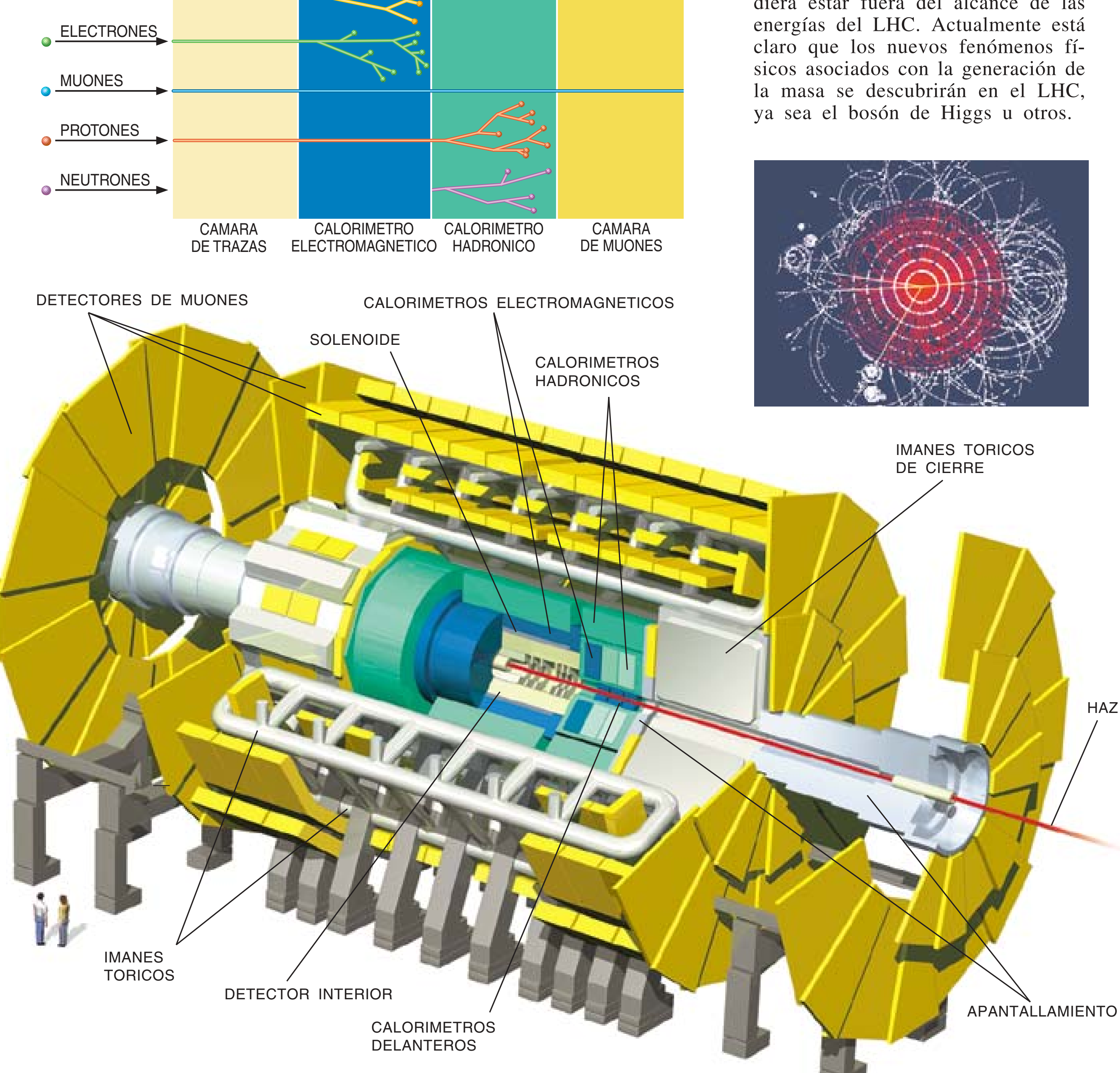
3. SECCION TRANSVERSAL de un imán del acelerador. Las bobinas superconductoras transportan una corriente de 12.000 amperios y han de mantenerse refrigeradas por debajo de dos kelvin. Cada tubo de haz contiene uno de los dos haces de protones que se mueven en sentido contrario. Otros imanes enfocan los haces y los curvan de manera que se crucen en los puntos de colisión, situados dentro de los detectores.

4. EL DETECTOR ATLAS (*abajo de todo*) —acrónimo de "A Toroidal LHC ApparatuS"— utiliza un novedoso sistema de imanes tóricos. Los protones chocan en el centro del detector, produciendo un chorro de partículas. Las capas concéntricas de ATLAS detectan diferentes especies de partículas. Algunas de ellas siguen con precisión las trayectorias de las partículas, mientras que otras (llamadas "calorímetros") miden la energía que transportan. El esquema simplificado (*abajo, a la izquierda*) ilustra cómo funcionan tales capas. Los imanes tóricos curvan las trayectorias de las partículas cargadas, lo que permite medir su momento. La imagen (*abajo, a la derecha*) muestra datos simulados de una colisión en la que una partícula Higgs se desintegra en cuatro muones (*trazos amarillos*).

metría. Si la supersimetría fuese correcta, los físicos tendrían muy buenas razones para creer que el LHC podría encontrar las nuevas partículas por ella predichas.

Estos nuevos fenómenos podrían descubrirse antes de que el LHC empiece a funcionar. La energía del LEP se sigue incrementando más allá de los 100 gigaelectronvoltios (GeV) por haz y el Tevatron del Fermilab estadounidense volverá a hacer chocar de nuevo haces de protones y de antiprotones el año próximo, tras una importante mejora que se ha completado en 1999. Cualquiera de las dos máquinas podría "adelantarse" al LHC con algún descubrimiento, como el reciente del neutrino del tau, o tauónico, la única partícula de materia del modelo estándar que quedaba por descubrir. Pero aunque lo hicieran, no harían más que revelar la punta de un nuevo iceberg y el LHC seguiría siendo el lugar donde se harían los estudios completos de los nuevos procesos.

Si ni el LEP ni el Tevatron observan estos nuevos fenómenos, el LHC emprenderá su búsqueda. Su rango de exploración se solapa con el de los aceleradores actuales, sin dejar espacios en los que la nueva física se pudiera ocultar. Las medidas de gran precisión realizadas durante los últimos siete años en el LEP, en el Stanford Linear Accelerator Center y en el Fermilab han eliminado además prácticamente la duda de que el bosón de Higgs pudiera estar fuera del alcance de las energías del LHC. Actualmente está claro que los nuevos fenómenos físicos asociados con la generación de la masa se descubrirán en el LHC, ya sea el bosón de Higgs u otros.



Emulando la gran explosión

El estudio de esta clase de fenómenos requiere la recreación de las condiciones que existieron justo después de una billonésima de segundo tras la gran explosión, una tarea que exige llevar las técnicas modernas hasta sus límites y aún más allá. Tan sólo analizaré tres de los subsistemas del LHC que son más decisivos y que han supuesto un mayor reto técnico: los imanes del acelerador, la adquisición de datos y los detectores.

Para mantener a los haces de protones de 7 TeV en su trayectoria, los imanes de curvatura del acelerador tienen que crear un campo magnético de 8,3 tesla, casi 100.000 veces el campo magnético de la Tierra y el mayor jamás usado en un acelerador. Para conseguirlo se basarán en la superconductividad. Por delgados hilos superconductores pueden fluir sin resistencia grandes corrientes, lo que permite construir imanes compactos capaces de generar intensidades de campo magnético imposibles de obtener mediante los electroimanes habituales, hechos a base de hilos de cobre (*véase la figura 3*). Para que funcione continuamente la superconductividad —con 12.000 amperios de corriente— hay que mantener los núcleos de los imanes a –271 grados C en los 22,4 kilómetros del túnel. Nunca antes se había intentado la criogenia a tal escala.

En diciembre de 1994 funcionó durante 24 horas un prototipo de una parte del LHC, lo que confirmó que las especificaciones técnicas fundamentales de los imanes eran correctas. Desde entonces se han hecho otras pruebas con prototipos que han simulado unos 10 años de funcionamiento del LHC (*véase la figura 2*).

Como el proyecto del SSC de 40 TeV se canceló en 1993, el LHC de 14 TeV es el único proyecto de acelerador del mundo que puede mantener un programa de investigación variado en la frontera de las altas energías. La decisión de emplear haces de la máxima intensidad posible en el LHC parecía muy arriesgada a principios de 1990, cuando se estaba acabando el proyecto del SSC, porque no estaba claro que los detectores fueran capaces de tratar el enorme ritmo de producción de datos ni de resistir los daños de la radiación provocada por el gran número de partículas desprendido en las colisiones. Pero gracias al desarrollo de los detectores generado por el SSC y el LHC ahora es factible.

Los intensos haces plantean extraordinarias dificultades para la adquisición de datos a quienes planean los experimentos. Los haces consisten en paquetes de protones unidos como los eslabones de una cadena, separados por 25 milmillonésimas de segundo. Pares de estos paquetes se cruzarán 40 millones de veces por segundo en cada punto de colisión, produciendo unas 20 colisiones protón-protón cada vez. Los choques se repetirán tan a menudo que las partículas de uno estarán pasando todavía por los detectores cuando se produzca el siguiente. De estos 800 millones de colisiones por segundo, sólo aproximadamente una entre mil millones será una colisión frontal entre quarks. Para resistir este ritmo furioso, la información del detector permanecerá en unos conductos electrónicos lo suficientemente largos como para almacenar los datos de unos cuantos miles de colisiones. Esto permitirá que la electrónica subsiguiente tenga el tiempo suficiente para decidir cuándo una colisión es interesante y debe registrarse antes de que los datos alcancen el final

El modelo estándar

El modelo estándar de la física de partículas resume nuestro conocimiento de las partículas fundamentales y de cómo se relacionan entre sí. Incluye dos clases de ellas: partículas de materia y partículas que transmiten fuerzas. Por ejemplo, la fuerza electromagnética entre un protón y un electrón se genera mediante fotones (partículas de luz) que se intercambian entre ellos.

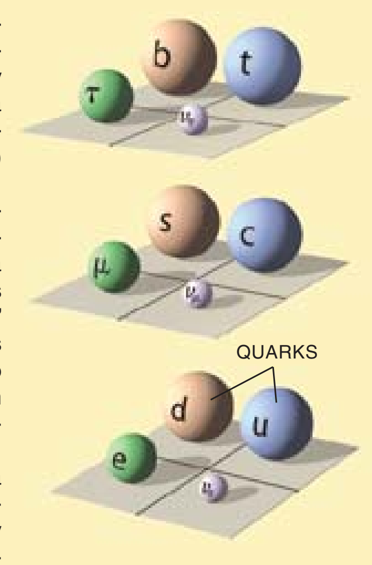
Las partículas de materia pertenecen a tres familias de cuatro miembros cada una; lo que diferencia a una familia de otra es su masa. Toda la materia que nos rodea está formada por partículas de la familia más ligera. Son los quarks "arriba" (*up*), los quarks "abajo" (*down*), los electrones y los neutrinos electrónicos. Las otras dos familias sólo existen efímeramente después de ser creadas en colisiones de alta energía (los neutrinos, sin embargo, tienen una vida larga).

Los quarks se mantienen unidos mediante la fuerza fuerte, transmitida por los gluones, formando "hadrones", entre los que se incluyen los protones y los neutrones, que a su vez se combinan para formar los núcleos atómicos. Los electrones, atraídos hacia estos núcleos por la fuerza electromagnética transportada por los fotones, orbitan en torno a los núcleos, formando átomos y moléculas. La interacción débil, transportada por las partículas W y Z, ayuda a la combustión solar y es responsable del proceso en el que un núcleo atómico se desintegra y emite un electrón y un neutrino.

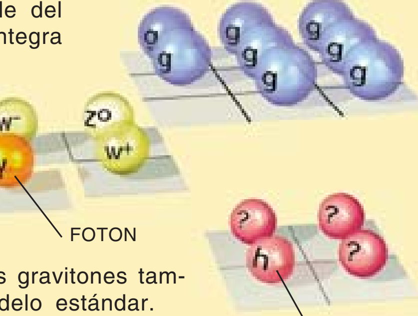
La gravedad, la fuerza más débil, es la que nos es más familiar, debido a que actúa sobre la masa y nosotros vivimos sobre un objeto de gran masa, la Tierra. Se supone que unas partículas llamadas gravitones transportan la gravedad, pero no han sido detectadas, debido a que la fuerza es tan débil. Los gravitones tampoco encajan de manera adecuada en el modelo estándar.

La totalidad del sistema de materia y de fuerzas (excepto la gravedad) puede compendiarse en unas cuantas ecuaciones sencillas, derivadas de una función (el "lagrangiano" del sistema), que se organiza sobre un principio básico (conocido como simetría de aforo [*gauge*] local). La razón de que la naturaleza tenga tres familias de materia es precisamente una de las muchas cuestiones no contestadas por el modelo estándar. Considerado uno de los grandes triunfos intelectuales de la ciencia del siglo XX, puede que el modelo estándar no sea más que un peldaño hacia una descripción más completa de las fuerzas de la naturaleza. —*Graham P. Collins*

FERMIONES (MATERIA)



BOSONES (FUERZAS)



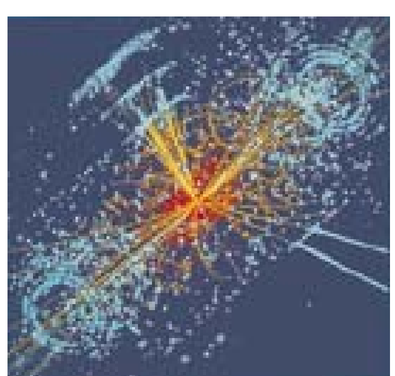
del conducto y se pierdan. Los detectores del LHC tendrán decenas de millones de canales de lectura. El manejo de todas estas señales que se originan en una misma colisión protón-protón y se almacenan en el conducto será todo un reto intelectual.

Choques de quarks

Los detectores de partículas son los ojos electrónicos de los físicos, que diligentemente observan cada suceso en busca de señales de los más interesantes. El LHC tendrá cuatro detectores de partículas. Dos serán gigantescos; cada uno de ellos estará construido como una muñeca rusa (una "matryoshka"), con módulos que se ajustan con precisión dentro de otros módulos y en cuyo centro estará el lugar de colisión. Cada módulo, repleto de los más modernos aparatos, se ha construido para realizar observaciones específicas antes de que las partículas pasen a la capa siguiente. Estos detectores de uso múltiple, ATLAS y CMS, que tienen 22 metros de alto, buscarán las partículas Higgs y la supersimetría y estarán atentos a lo inesperado, registrando tantos residuos de las colisiones como puedan. Dos detectores menores, ALICE y LHCb, se centrarán en otras áreas físicas específicas.

Tanto ATLAS como CMS están optimizados para detectar muones, electrones y fotones energéticos, cuya presencia pudiera indicar la producción de nuevas partículas, tales como los bosones de Higgs. Pero ambos utilizan métodos muy diferentes y estructuras y técnicas complementarias. Los años que se han dedicado a simular informáticamente su funcionamiento han demostrado que son capaces de detectar cualquier nuevo fenómeno que la naturaleza pueda exhibir. El detector ATLAS (acrónimo de "A Toroidal LHC ApparatuS") se basa en un enorme imán tórico equipado con detectores concebidos para identificar muones en el aire (*véase la figura 4*). El detector CMS (acrónimo de "Compact Muon Solenoid") sigue la técnica más tradicional de usar cámaras dentro del entrehierro de un imán solenoidal de gran potencia para detectar muones (*véase la figura 5*).

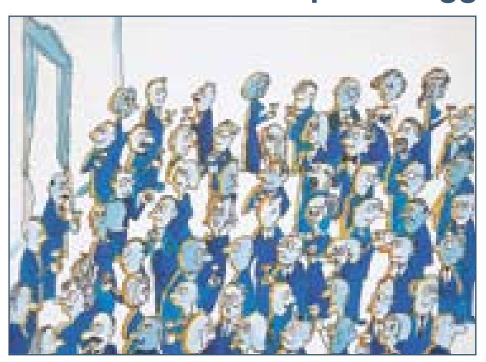
Parte del detector CMS estará formado por cristales que brillan, o centellean, cuando entran en ellos electrones y fotones. Tales cristales son extremadamente difíciles de fabricar y el CMS se beneficia de la expe-



BOBINA SUPERCONDUCTORA (SOLENOIDE)
CALORIMETRO ELECTROMAGNETICO
SEGUIDOR DE TRAZAS CENTRAL
CALORIMETRO HADRONICO
HIERRO
DETECTORES DE MUONES
HAZ

5. EL DETECTOR CMS —acrónimo de "Compact Muon Solenoid"— usa una estructura de imanes más tradicional y está optimizado para detectar muones. Aquí se muestra un despiece de CMS que permite ver los detectores de muones (*amarillo*) intercalados con capas de hierro (*naranja*) que encauzan el campo magnético producido por la bobina del solenoide superconductor. El calorímetro electromagnético (*azul*) contiene 80.000 cristales de tungstato de plomo para detectar electrones y fotones. El recuadro muestra datos simulados de una colisión en la que una partícula Higgs se desintegra en dos muones (los trazos en la posición de las 4 del reloj) y dos chorros de hadrones (a las 11 del reloj).

Así es como el campo de Higgs genera la masa



El espacio "vacío", que está ocupado por el campo de Higgs, es como una sala llena de gente charlando tranquilamente.



Una partícula que lo cruce es como una persona importante que llegase...



...y atrajese un cúmulo de admiradores que impidieran su avance. El personaje adquiriría "masa."

Creación de las partículas de Higgs



La energía proveniente de un choque de partículas pudiera ser como un rumor que cruzase la sala...



...creando una acumulación parecida, que se sostendría a sí misma, como lo haría una partícula de Higgs.

riencia obtenida del actual experimento L3 del CERN, que también los usa. (El detector L3 es uno de los cuatro que han estado en funcionamiento desde 1989 en el colisionador LEP, con el que se han realizado estudios de precisión de la fuerza débil, cuyo resultado ha sido que existen exactamente tres clases de neutrinos cuya masa es cero o muy pequeña.) Antes del L3 tales cristales sólo se habían fabricado en pequeñas cantidades, pero L3 necesitó 11.000 de ellos. El tipo de cristales desarrollado para L3 se usa mucho actualmente en dispositivos de obtención de imágenes médicas. CMS necesita siete veces más de tales cristales, que estarán hechos de un material más robusto. Es probable que la calidad superior de los cristales del CMS tenga unas consecuencias aún mayores en el campo médico a su debido tiempo.

ALICE (acrónimo de "A Large Ion Collider Experiment") es un experimento más especializado, que tendrá lugar cuando en el LHC choquen núcleos de plomo a la colosal energía de 1150 TeV. A tal energía se espera que se "fundan" los más de 400 protones y neutrones de los núcleos colisionantes, desprendiendo sus quarks y gluones para formar un glóbulo de plasma de quarks y gluones (QGP, de "Quark-Gluon Plasma"), como el que dominó el universo unos 10 microsegundos después de la gran explosión [*véase* "Una gran explosión originaria en pequeño" por Madhusree Mukerjee; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 1999]. ALICE utiliza el imán del experimento L3, con nuevos detectores optimizados para el estudio del QGP.

Existen datos convincentes de que los experimentos del CERN ya han creado un plasma de quarks y gluones. El Colisionador de Iones Pesados Relativista ("Relativistic Heavy Ion Collider", RHIC) del Brookhaven National Laboratory tendrá una buena oportunidad de estudiar detalladamente el QGP en los próximos años, a base de dotar a sus colisiones de diez veces más energía por nucleón que la que almacenan los actuales programas del CERN. El LHC la aumentará aún más, por un factor de 30. La mayor energía del LHC complementará el más variado conjunto de experimentos del RHIC, garantizando un estudio completo de una importante fase de la evolución del universo primitivo.

El mesón B, el objetivo de las investigaciones del LHCb, nos podrá ayudar a saber por qué el universo está formado de materia en vez de tener iguales cantidades de materia y de antimateria [*véase* "Asimetría entre materia y antimateria" por Helen R. Quinn y Michael S. Witherell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 1998]. Un tal desequilibrio no puede surgir más que si los quarks y los antiquarks pesados se desintegran en sus parientes más ligeros con ritmos diferentes. El modelo estándar puede acomodar este fenómeno, conocido como violación de CP, pero probablemente de manera insuficiente como para explicar del todo el predominio de la materia en el universo. Los físicos han observado la violación de CP en la desintegración de los quarks extraños, pero son necesarios los datos relativos a los pesados quarks y antiquarks "fondo" (*bottom*), los constituyentes de los mesones B, a fin de establecer si la descripción del modelo estándar es correcta.

En 1999 empezaron los experimentos en dos "fábricas de B" (las llamadas "B factories"), situadas en California y en Japón, que pueden producir decenas de millones de mesones B por año. La gran luminosidad de los haces del LHC puede producir un billón de mesones B por año para el LHCb, lo que permitirá estudios de mucha mayor precisión y quizás el descubrimiento de modos de desintegración inauditos y decisivos, que son demasiado raros para que las otras fábricas los vean claramente.

Un laboratorio para el mundo

Experimentos científicos tan ambiciosos como el proyecto LHC son demasiado caros para que un solo país pueda acometerlos. Cierto es que la colaboración internacional siempre ha desempeñado una función en la física de partículas, ya que los científicos se sienten atraídos por los laboratorios mejor habilitados para sus intereses investigadores, con independencia de su situación. A medida que los detectores han devenido más grandes y más costosos, el tamaño y la dispersión geográfica de las colaboraciones que han ayudado a su construcción han crecido de manera correspondiente. (Fue la necesidad de facilitar la comunicación entre las grandes cantidades de colaboradores del LEP lo que estimuló la invención de la "World Wide Web" por Tim Berners-Lee, en el CERN.)

Tal como se aprobó en un principio, el acelerador LHC se iba a financiar exclusivamente por los (entonces) 19 estados miembros europeos del CERN, de manera que la construcción tuviera lugar en dos fases, siguiendo un lento y penoso calendario, un plan que era científicamente pobre y más caro en conjunto que una realización más rápida, en una sola fase. Afortunadamente hay fondos adicionales de otros países que acelerarán y mejorarán el proyecto. Alrededor de un 40 por ciento de los usuarios del LHC provendrá de estos países. Contribuciones para la fabricación de los componentes del acelerador (además del trabajo en los detectores) han sido acordadas por Canadá, India, Israel, Japón, Rusia y los E.U.A. El laboratorio KEK del Japón, por ejemplo, proporcionará 16 imanes focalizadores especiales. Los E.U.A., que ya tienen más de 550 investigadores implicados en los experimentos del LHC, proporcionarán el mayor grupo nacional; componentes del acelerador serán proyectados y fabricados por Brookhaven, Fermilab y Lawrence Berkeley National Laboratory.

En comparación con otros detectores previos, ATLAS y CMS contarán por lo menos con cuatro veces más participantes. 5000 científicos e ingenieros de más de 300 universidades e institutos de investigación de 50 países de seis continentes participan en la construcción de los cuatro detectores. Cuando es posible, los componentes se fabrican en las instituciones participantes, al alcance de los estudiantes (que se formarán muy bien trabajando en tales proyectos) y en colaboración con industrias locales. El análisis de datos también estará disperso. Será un reto formidable la organización de estos proyectos situados en los límites de la técnica, con sus estrictas especificaciones y sus apretados calendarios, manteniendo al mismo tiempo la democracia y la libertad de las iniciativas científicas que son esenciales para que prospere la investigación.

El CERN ha sido fundamentalmente un laboratorio europeo hasta ahora. Con el LHC está llamado a convertirse en un laboratorio del mundo. Sus 7000 usuarios científicos actuales ya representan más de la mitad de los físicos experimentales de partículas del mundo.

Participación española

Martine

España es miembro del CERN y participa en el programa LHC. Nueve grupos de físicos experimentales españoles colaboran en los proyectos de tres de los cuatro grandes detectores que observarán las colisiones de protones que en él se produzcan. Se trata de un centenar de investigadores, ingenieros y estudiantes de doctorado. El número no es grande, comparado con la totalidad del personal científico y técnico implicado, pero los grupos españoles son responsables de algunos de los componentes más importantes de los aparatos.

La mayoría de estas personas se dedica a los grandes detectores, ATLAS y CMS, cuyas dimensiones y complejidad obligan a dedicar varios años a su construcción e instalación. El proyecto técnico de estos aparatos ya está terminado y se están fabricando. El tercer detector con participación española es LHCb, un aparato de menor tamaño que se encuentra en una fase menos avanzada y en el que colaboran el grupo del Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) en la Universidad de Barcelona y personal de la Universidad de Santiago de Compostela.

ATLAS y CMS pretenden observar las señales características de la producción de un bosón de Higgs, de partículas supersimétricas o de fenómenos que escapen al modelo estándar. La presencia de parejas de leptones de alta energía (electrones, muones o tauones) podría indicar la producción de partículas de masas mayores que 100 GeV, rango aún inexplorado, por lo que es necesario que sus trayectorias y sus energías puedan identificarse y medirse con precisión. Si los quarks no fuesen partículas elementales y si su estructura interna pudiera apreciarse a la escala de 10^{-19} m, aparecerían abundantes chorros de hadrones, dotados de energías transversas (en el plano perpendicular a los haces) de unas centenas de GeV.

Las teorías supersimétricas prevén en cambio nuevas partículas que no dejarían energía en los detectores, provocando un desajuste en la energía transversa de los chorros. Esta es una de las razones de que los dos grandes detectores estén equipados con "calorímetros", que captarán y medirán la energía de los electrones, de los fotones y de los hadrones que se generen en las colisiones. Los muones no dejan más que una mínima parte de su energía en los calorímetros, por lo que la mayor parte del volumen de ATLAS y CMS consiste en enormes detectores de muones, si se excluyen los propios calorímetros.

El detector CMS medirá la curvatura de la trayectoria de los muones (y por tanto su energía), tanto en el interior como en el exterior de un imán solenoidal de campo muy potente. Los detectores de muones de la parte externa estarán encajados en el hierro del imán. Su prototipo es bien conocido, la llamada "cámara de deriva", pero aquí alcanzarán una escala sin precedentes. En el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de Madrid se fabrica la cuarta parte de las cámaras de la parte cilíndrica del detector (en amarillo en la figura de CMS). Es un total de 70 cámaras de 6 m^2 cada una, que incluyen como sensores unos 45.000 hilos metálicos, montados con una precisión de decenas de micrometros. La electrónica digital que recogerá los datos de estos detectores también corre a cargo de este equipo. En coordinación con él trabaja otro de la Universidad de Cantabria, en Santander, que proyecta y suministrará el aparato que, por medios ópticos y electrónicos, permitirá realizar la alineación de los detectores externos e internos al imán.

Los detectores de las trayectorias de las partículas cerca del punto de colisión, de la energía de los electrones y fotones y de los chorros de

en el programa experimental del LHC

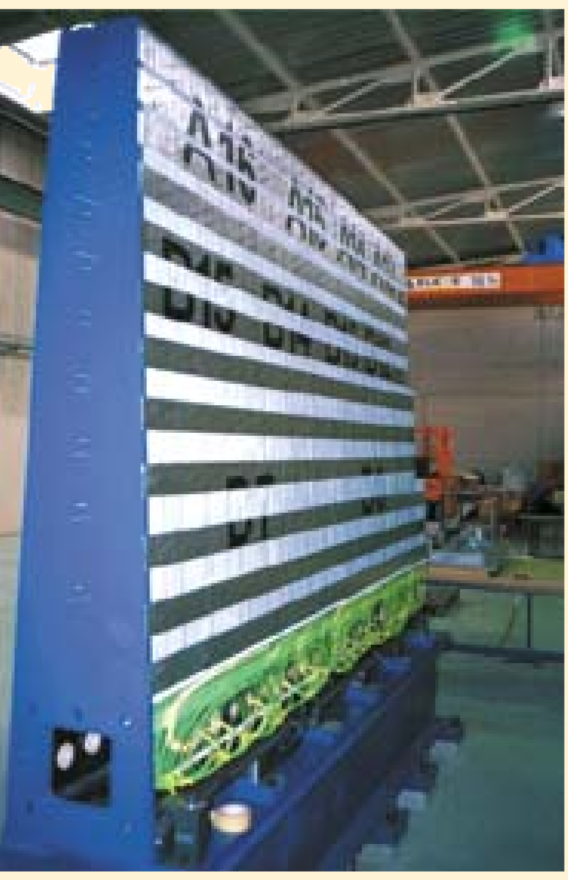
Bosman y Matteo Cavalli-Sforza

hadrones son tarea de los grupos que colaboran en ATLAS. Uno del Instituto de Física Corpuscular, Centro Mixto de la Universidad de Valencia y del CSIC, se dedica a la construcción y puesta a punto de los detectores de silicio que medirán la trayectoria de las partículas cargadas producidas. El grupo de Valencia colabora con el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona en el ensamblaje y en las pruebas de los circuitos de lectura de dichos detectores. Corren de su cuenta unos 280.000 de los 6 millones de canales del detector. Un grupo de la Universidad Autónoma de Madrid contribuye a la construcción de los calorímetros electromagnéticos situados en la parte delantera de ATLAS. Estos detectores medirán la energía de electrones y fotones (principalmente para observar desintegraciones de bosones de Higgs) mediante las señales dejadas en argón líquido (refrigerado a 89 K) intercalado con capas de plomo.

El Instituto de Física de Altas Energías de Barcelona construye una de las grandes “ruedas” del calorímetro hadrónico central de ATLAS, cuyo propósito es medir la energía de los chorros. La rueda (en verde en la figura de ATLAS) tiene un diámetro de 8,5 m por un grosor de 2,6 m y se compone de 64 módulos, como los gajos de una naranja, cada uno de los cuales pesa 11 toneladas y está compuesto por unas 2000 placas de acero, 1500 placas de plástico centelleador y otras tantas fibras ópticas. Las partículas producen luz en el centelleador, que las fibras conducen hacia los fotomultiplicadores. A cargo del grupo del IFAE está también el equipo electrónico de calibración del calorímetro entero, mientras que una parte del equipo valenciano proporcionará subconjuntos mecánicos y una determinada cantidad de fotomultiplicadores, además de asumir otras responsabilidades en la circuitería de elaboración de los datos.

Una empresa asturiana, Felguera Construcciones Mecánicas, está construyendo, bajo la supervisión del IFAE, los ocho criostatos que contendrán otras tantas bobinas superconductoras para el imán tórico central de ATLAS. Cada uno de ellos garantizará el vacío y las condiciones criogénicas en un recorrido cerrado de 26 m de largo y 5 m de ancho. Se trata de criostatos de dimensiones sin precedentes en el mundo de los imanes superconductores y suponen un gran desafío técnico. (Tres de los ocho se ven en gris en la figura del detector.)

Otra gran dificultad que ha de vencerse en los experimentos del LHC es la de tomar en pocos milisegundos una decisión sobre cuáles sean los eventos físicamente interesantes de entre los casi mil millones de colisiones que se producirán cada segundo. El último paso de esta selección será la reconstrucción de los sucesos del LHC mediante potentes conjuntos de ordenadores. En el IFAE se trabaja en la optimización de los algoritmos de selección, al tiempo que se estudian nuevos esquemas de engarce entre los ordenadores que realizarán la tarea.



UN MODULO del calorímetro hadrónico de ATLAS, completamente ensamblado, en el taller del IFAE. Se pueden ver las fibras ópticas, de color verde.

M. Bosman y M. Cavalli-Sforza son investigadores del Instituto de Física de Altas Energías, un consorcio de la Generalidad de Cataluña y de la Universidad Autónoma de Barcelona. Bosman dirige las actividades de reconstrucción y selección de eventos. Cavalli-Sforza fue uno de los impulsores del concepto de calorimetría hadrónica utilizado por ATLAS. En los años 1998-99 fue presidente del máximo comité de toma de decisiones de ATLAS.

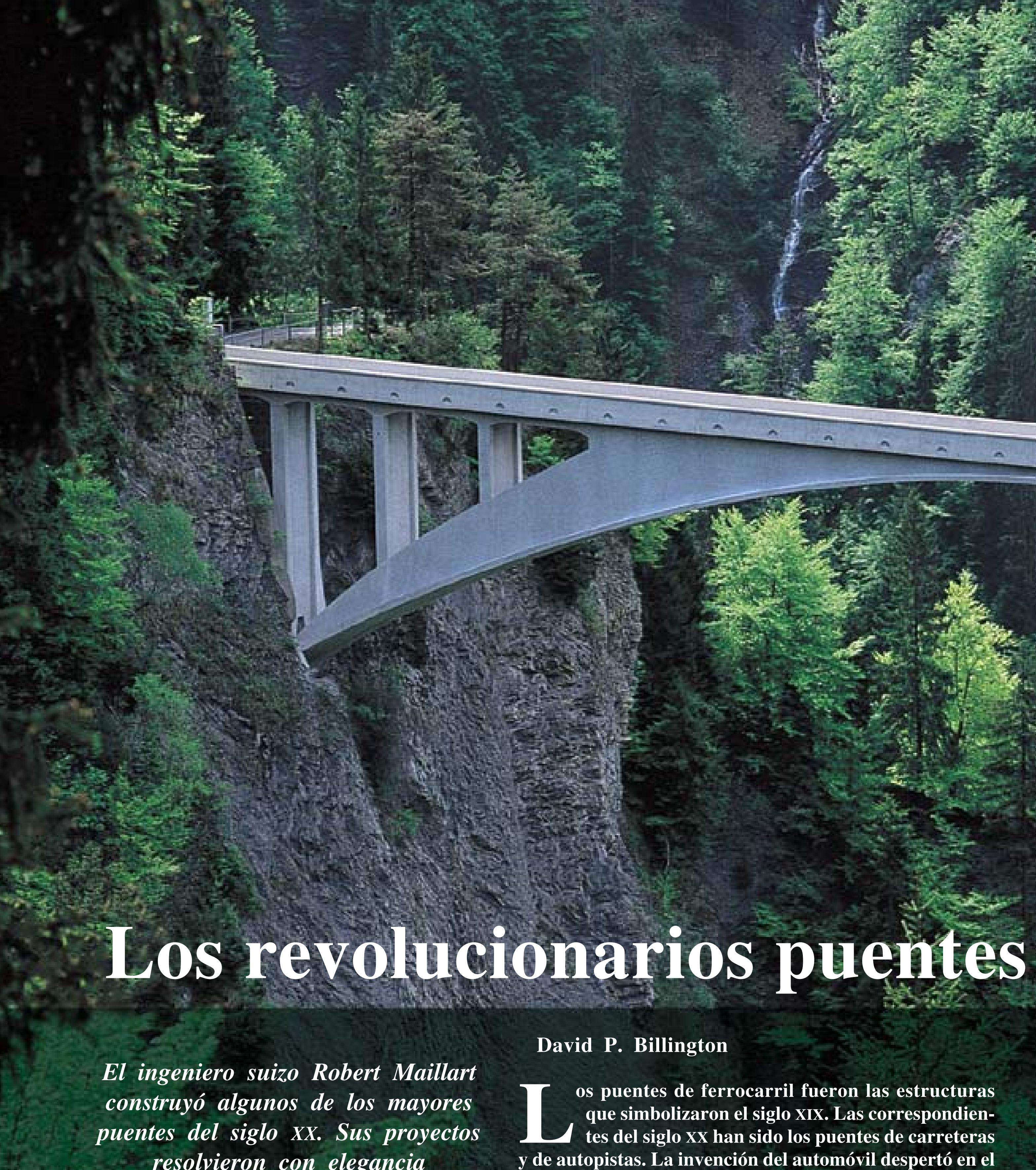
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PARTICLE CENTURY. Dirigido por Gordon Fraser. Institute of Physics, 1998.

SUPERSYMMETRY. Gordon Kane. Perseus Publishing, 2000.

Los enlaces a las páginas web de los cuatro experimentos del LHC están en la página web del CERN www.cern.ch/CERN/Experiments.html

Otras dos excelentes direcciones son http://pdg.lbl.gov/atlas/atlas.html y www.particleadventure.org

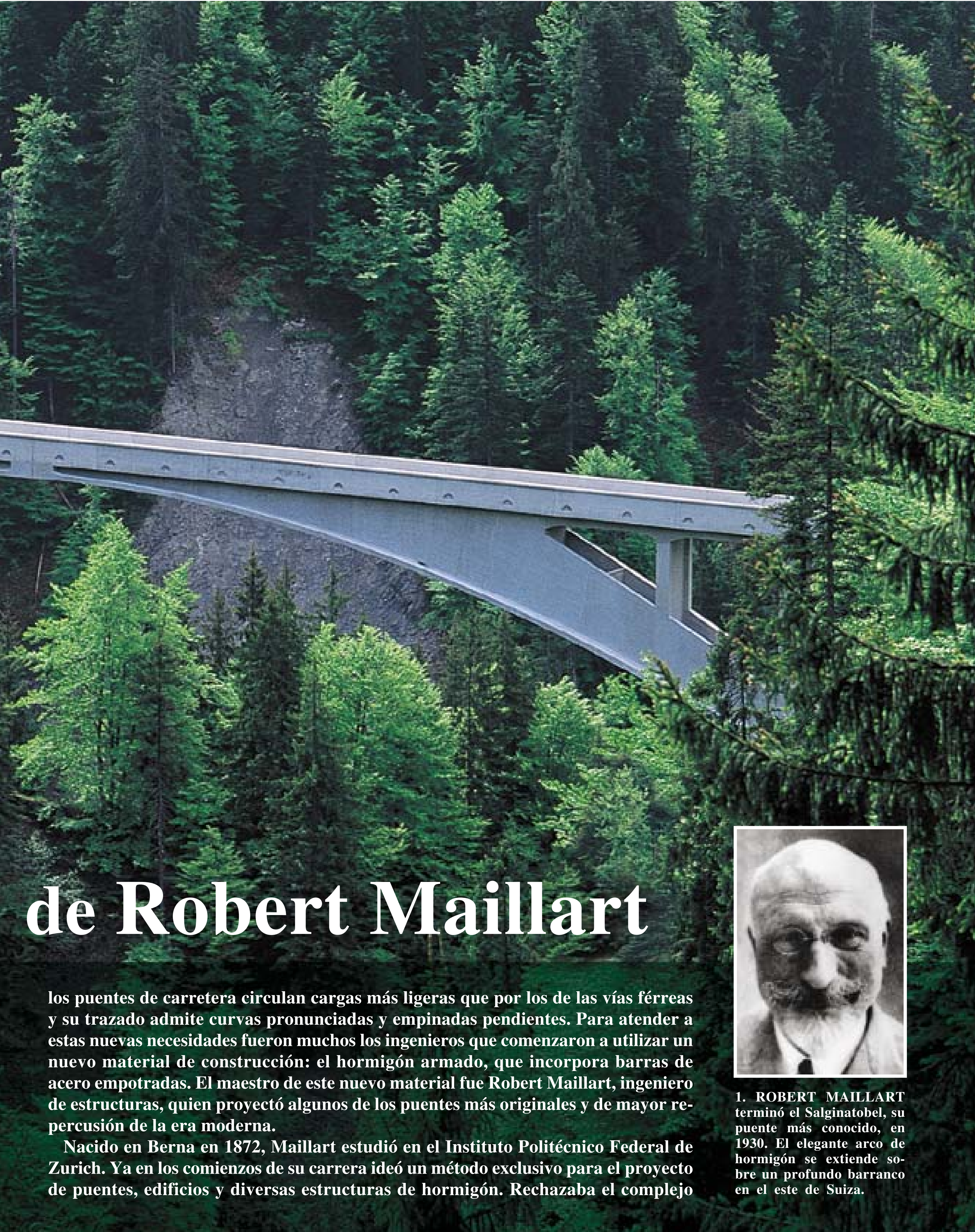


Los revolucionarios puentes

El ingeniero suizo Robert Maillart construyó algunos de los mayores puentes del siglo XX. Sus proyectos resolvieron con elegancia el problema básico de cómo soportar cargas enormes con arcos esbeltos

David P. Billington

Los puentes de ferrocarril fueron las estructuras que simbolizaron el siglo XIX. Las correspondientes del siglo XX han sido los puentes de carreteras y de autopistas. La invención del automóvil despertó en el mundo civilizado una demanda irresistible de carreteras pavimentadas y de puentes aptos para el tránsito de vehículos. Pero coches y camiones necesitan puentes de un tipo muy distinto que las locomotoras. Por la mayoría de



de Robert Maillart

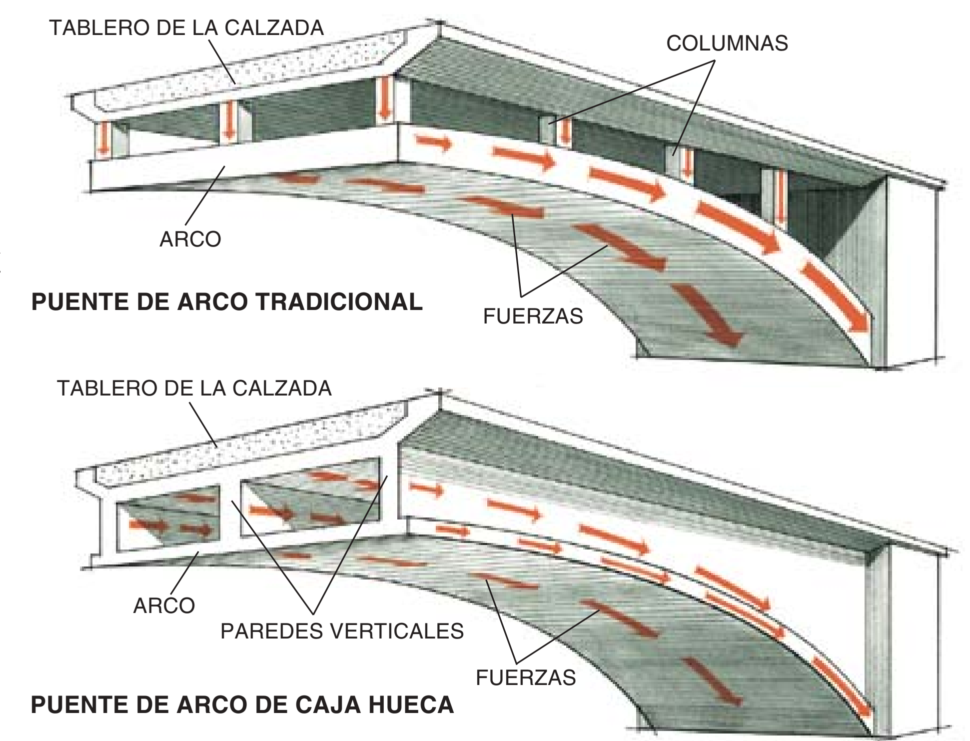
los puentes de carretera circulan cargas más ligeras que por los de las vías férreas y su trazado admite curvas pronunciadas y empinadas pendientes. Para atender a estas nuevas necesidades fueron muchos los ingenieros que comenzaron a utilizar un nuevo material de construcción: el hormigón armado, que incorpora barras de acero empotradas. El maestro de este nuevo material fue Robert Maillart, ingeniero de estructuras, quien proyectó algunos de los puentes más originales y de mayor repercusión de la era moderna.

Nacido en Berna en 1872, Maillart estudió en el Instituto Politécnico Federal de Zurich. Ya en los comienzos de su carrera ideó un método exclusivo para el proyecto de puentes, edificios y diversas estructuras de hormigón. Rechazaba el complejo

1. ROBERT MAILLART terminó el Salginatobel, su puente más conocido, en 1930. El elegante arco de hormigón se extiende sobre un profundo barranco en el este de Suiza.



2. EL ARCO DE CAJA HUECA fue la primera innovación importante de Maillart en el proyecto de puentes de hormigón. El peso del tablero de los puentes arqueados corrientes se transfiere por columnas al arco, que tiene que ser relativamente grueso para mantener bajas las tensiones de flexión (*arriba*). Pero en el puente de caja hueca las paredes verticales unen el tablero con el arco (*abajo*) y la carga se reparte entre tablero, paredes y arco en la mayor parte del vano. En 1901 Maillart utilizó este proyecto para construir el esbelto y económico puente de Zuoz (*izquierda*).



análisis matemático de cargas y esfuerzos que ensalzaban la mayoría de sus contemporáneos, al tiempo que evitaba el enfoque decorativo adoptado por muchos constructores de puentes de aquella época. Se resistía a imitar estilos arquitectónicos y a añadir detalles meramente ornamentales en sus proyectos. Maillart poseía una gran intuición para crear formas nuevas que resolvieran los problemas clásicos de la ingeniería. Y como trabajaba en un terreno muy reñido se planteó la economía como uno de sus objetivos. De hecho ganó muchos concursos de proyecto y construcción por lo razonable del precio de sus estructuras, situado a menudo por debajo de las ofertas de sus rivales. Podremos entender mejor su técnica si examinamos con detalle las obras que mejor representan tan novedoso concepto.

El análisis de proyectos por medios matemáticos es un signo distintivo de la ingeniería moderna. Aplicando los principios básicos de la mecánica se pueden calcular las fatigas y tensiones producidas en una estructura sometida a cargas como, por ejemplo, el peso de los vehículos sobre un puente o la fuerza que ejerce el viento sobre un rascacielos. Estos análisis permiten predecir su comportamiento con mucha mayor precisión y determinar si podrán resistir huracanes y terremotos. Pero se da la paradoja de que la excesiva dependencia del análisis estructural ha limitado las perspectivas de muchos proyectistas. Con demasiada frecuencia los ingenieros contemporáneos dan por sentado que no puede construirse una estructura que no admita un análisis riguroso.

El primer puente importante de Maillart desmintió tal idea. En 1900, cuando trabajaba para la constructora Froté y Westermann de Zurich, comenzó el proyecto de un puente sobre el río Inn en la pequeña población suiza de Zuoz. Las autoridades locales deseaban inicialmente un puente de acero que salvara los 30 metros de anchura del río, pero Maillart sostuvo que podía construirse uno de hormigón armado, mucho más elegante, más o menos por el mismo precio. Su proyecto contemplaba un puente de un solo ojo, con articulaciones en los estribos y en la clave del arco (punto medio del puente) para evitar los esfuerzos de flexión en esos puntos. Su innovación decisiva fue la de integrar el arco y el tablero del puente en una estructura llamada arco de caja hueca, que reduciría notablemente la cantidad de hormigón necesaria y por lo tanto el coste total del puente.

El peso del tablero que soporta la calzada de circulación de los puentes arqueados habituales se transfiere al arco a través de columnas. El arco tiene que ser relativamente grueso para mantener bajos los esfuerzos de flexión creados por las cargas resultantes del tráfico que atraviese el puente. El proyecto de Maillart consistió en cambio en conectar tablero y arco mediante tres paredes verticales, formando dos cajas huecas que abarcarían todo el tablero (*véase la figura 2*). La gran ventaja del proyecto era que la carga iba soportada por las tres partes de la caja hueca, el tablero, el arco y las paredes, en casi todo el vano del puente. (Cerca

DAVID P. BILLINGTON se graduó en ingeniería en Princeton en 1950. Fue proyectista de estructuras en la firma Roberts & Schaefer de Nueva York, incorporándose luego a la facultad de Princeton en 1960, donde lleva 40 años enseñando ingeniería.

de los estribos la carga se embocaría en el arco y en las articulaciones de los estribos.) Dado que ya no tendría que aguantar por sí solo la carga, el arco podría ser mucho más delgado, reduciéndose su espesor a un tercio del de un puente corriente.

Maillart empleó un análisis gráfico simplificado para evaluar la viabilidad de su proyecto. No podía realizarse un análisis estructural riguroso, porque ningún ingeniero de aquel tiempo era capaz de calcular con exactitud los esfuerzos dentro de un arco de caja hueca de hormigón, ya que el tratamiento matemático era demasiado complejo. Cuando Wilhelm Ritter, la máxima autoridad en estructuras de Suiza, fue llamado como consultor para el proyecto de Zuoz, reconoció que no podía analizar matemáticamente el puente. Pero admitió que la estructura ideada por Maillart era sólida y recomendó que se construyera. El puente se terminó en 1901 y fue sometido a una prueba de carga a plena escala, en la que se midió el desplazamiento de la estructura al cruzar el puente unos carros bien cargados, arrastrados por caballos. Se logró el éxito en el terreno empírico aunque se mantuviera el misterio matemático.

Pero pasados dos años aparecieron grietas en las paredes verticales, cerca de los estribos del puente, debidas a las tensiones creadas por el secado gradual de la estructura. La contracción de las paredes se veía limitada por el arco y el tablero, que, por estar expuestos a la humedad, secaban más despacio. No por esto corría peligro el puente, pero de todos modos Maillart corrigió el defecto cuando en 1905 proyectó su primera obra maestra: el puente Tavanasa sobre el Rin en los Alpes suizos.

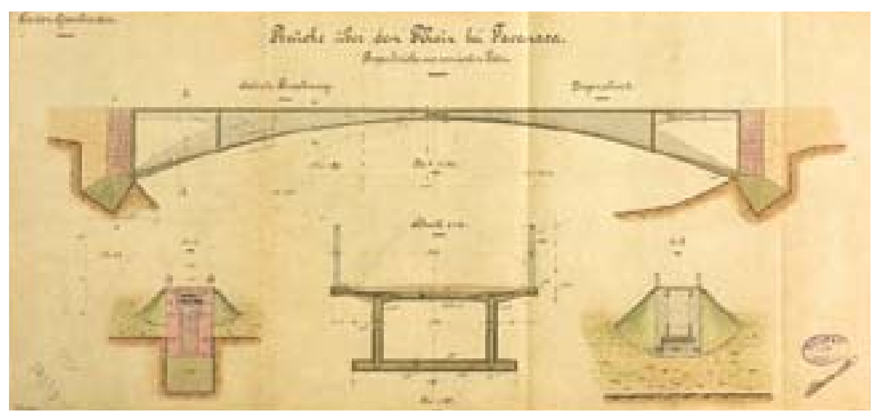
En este proyecto suprimió las partes de pared vertical más próximas a los estribos, que no resultaban esenciales porque no soportaban carga. Además de eliminar el problema de las grietas, el cambio dio ligereza y esbeltez a la estructura (*véase la figura 3*). La nueva forma satisfacía plenamente los requisitos estructurales del puente, que era fino y de apariencia ligera en la clave del arco y en los estribos, pero hondo en los dos puntos medios entre clave y estribo, que son precisamente los que soportan la carga máxima del tráfico en un puente de tres articulaciones. Por desgracia el puente de Tavanasa fue destruido en 1927 por una avalancha que ningún puente hubiese resistido.

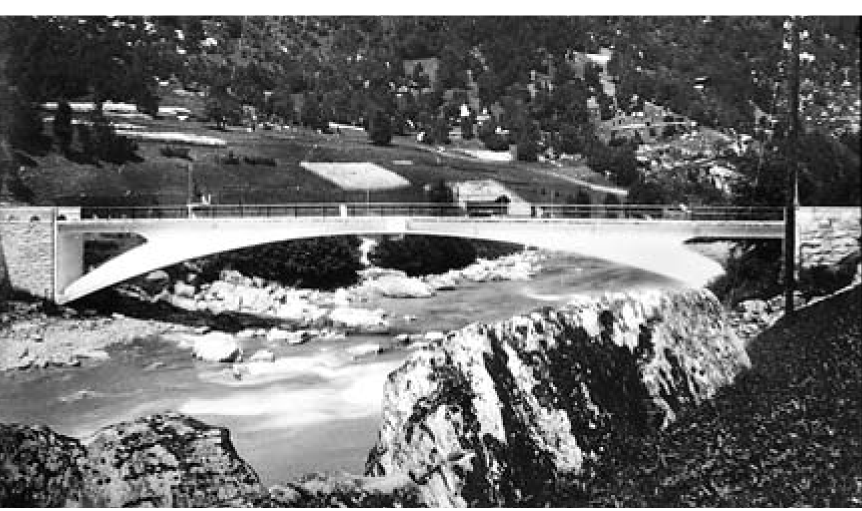
Depósitos de agua y almacenes

Las innovaciones de Maillart pasaron bastante inadvertidas al principio. El puente de Tavanasa no tuvo muy buena prensa en Suiza, provocando grandes reparos estéticos de los organismos públicos, más acostumbrados a los clásicos puentes de piedra. Maillart, que había fundado en 1902 su propia compañía constructora, no conseguía muchos más proyectos de puentes, por lo que se dedicó al proyecto de edificios, depósitos de agua y otras estructuras de hormigón armado.

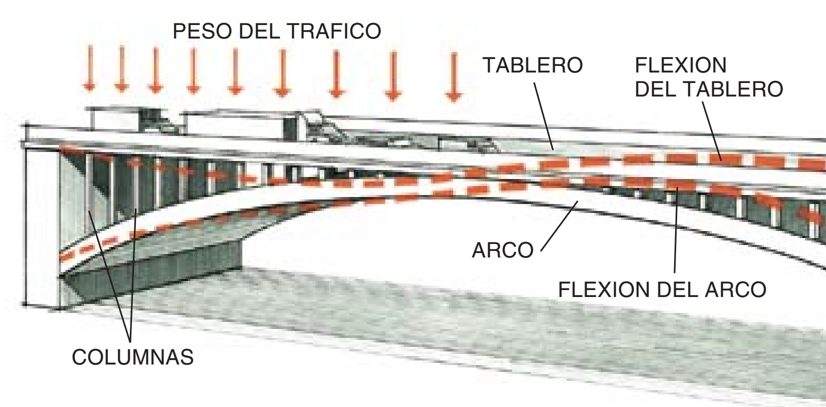
Su compañía había construido ya las bases de hormigón para dos grandes depósitos de gas en la ciudad suiza de Saint Gallen. Son unas estructuras cilíndricas que se llenan de agua para sellar el gas de los depósitos. Maillart proyectó unas bases ligeras, como lo eran sus puentes, y no utilizó más que la cuarta parte del hormigón exigido en los planes originales. Esta reducción tan espectacular se apoyó en un análisis en el que asimilaba las estructuras a barriles de agua ordinarios, rodeados por duelas verticales y aros circulares (*véase la figura 7*). La presión ejercida por el agua sobre las duelas de un barril se ve compensada por la tensión circunferencial de los aros, que mantiene unidas las duelas. Maillart sostuvo que las barras de acero empotradas en el hormigón armado cumplirían esa misma función por lo que las paredes de la base podrían ser relativamente delgadas.

El análisis gráfico del problema, publicado por Maillart en 1907, no





3. LOS PLANOS del puente de Tavanasa (*arriba*) muestran los refinamientos de su proyecto del arco de caja hueca. Utilizó dos únicas paredes verticales para unir el tablero con el arco y eliminó las secciones de las paredes próximas a los estribos. Finalizado en 1905 (*abajo*), este puente sobre el Rin fue destruido en 1927 por una avalancha.



4. EL ARCO DE TABLERO REFORZADO fue concebido por Maillart para sustentar cargas móviles no uniformemente distribuidas, como los vehículos que circulan por un puente. Cuando el tráfico gravita sólo sobre la mitad izquierda de un puente de arco habitual (*derecha*), la carga desviará hacia abajo dicha mitad izquierda y hacia arriba la mitad derecha (en la figura se han exagerado las desviaciones). El arco debe tener grosor suficiente para mantener bajas las tensiones de flexión. Pero en un puente de tablero reforzado (*derecha, al fondo*) se añade un refuerzo de acero a los pretiles para conseguir un tablero muy rígido. Este tablero se une al arco por paredes transversales, evitando así que el arco se levante o descienda. El proyecto permite que el arco sea esbelto, pues las fuerzas de tensión aplicadas son mínimas.

entraba en complicaciones matemáticas, pero era aplicable a cualquier forma de tanque cilíndrico de agua. Pero ese mismo año apareció un tratamiento matemático completo del caso, enfoque que más tarde se fue imponiendo dentro de la profesión. Lo curioso es que la complejidad del método matemático no permitía resolver más que unas cuantas estructuras sencillas.

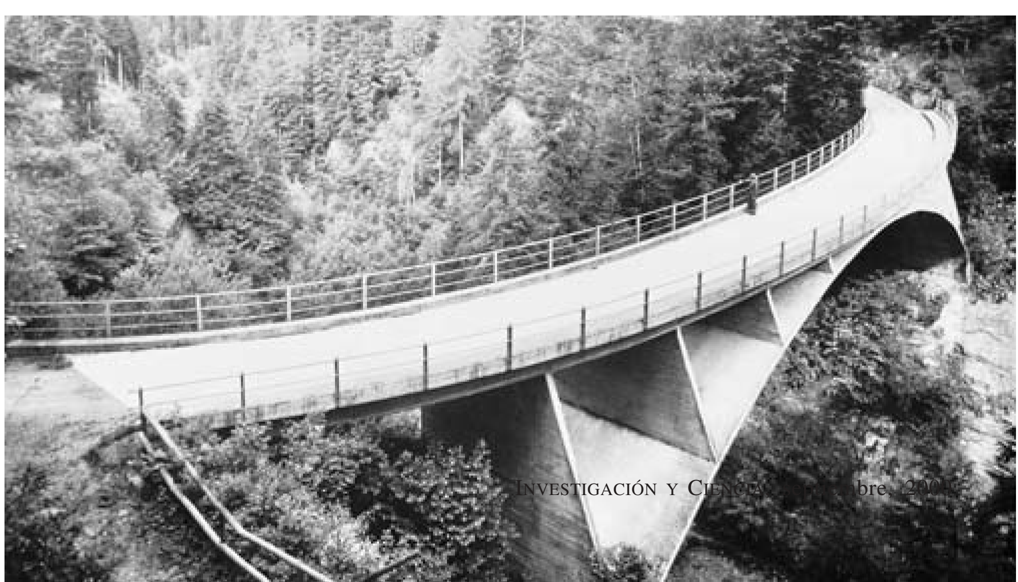
Cuando Maillart comenzó a trabajar en fábricas, almacenes y otras construcciones de hormigón, tropezó con otro problema técnico: dar sustentación a los suelos cargados con estructuras muy pesadas. Los suelos de los proyectos habituales estaban formados por losas de hormigón planas bajo las cuales corrían jácenas horizontales. Las losas transmitían su carga a las jácenas, que a su vez la descargaban sobre los pilares del edificio. Maillart buscó una solución más sencilla y económica, sin necesidad de vigas horizontales que sustentaran las losas. Otros ingenieros habían tratado de resolver el problema a base de matemáticas, pero sin resultados satisfactorios. En vez de batallar con las ecuaciones, Maillart construyó modelos de losas de hormigón y las sometió a pruebas de carga en el patio de su propia empresa constructora.

En su primera construcción con losas planas, un almacén de Zurich en 1910, Maillart utilizó columnas coronadas por capiteles abiertos, que se funden con la losa de hormigón situada encima. Las columnas reforzaban la sustentación al reducir notablemente el vano libre que dejan las losas. Pero además favorecían la estética: los capiteles proyectados por Maillart describían una suave curva hiperbólica desde la losa horizontal a las columnas octogonales verticales. Utilizó columnas similares en el Edificio Filter de Rorschach, Suiza, construido en 1912 (*véase la figura 8*). Estos proyectos reflejan la búsqueda de formas a la vez bellas, funcionales y poco costosas.

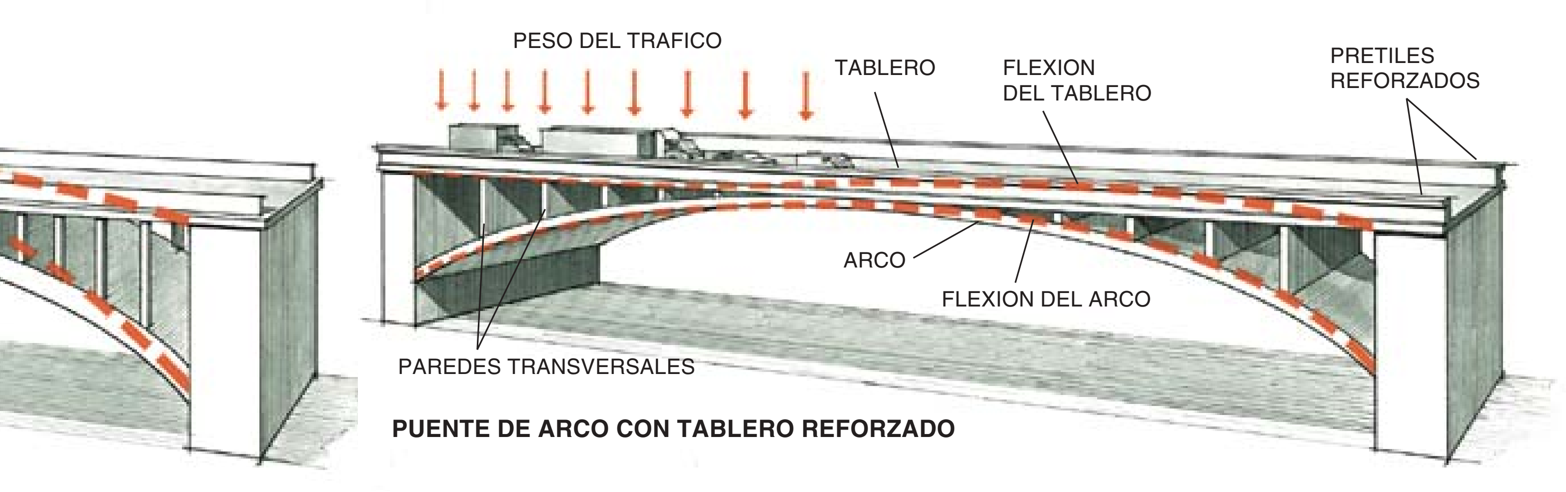
Una voz en el desierto

La empresa de Maillart prosperó a partir de 1912, emprendiendo grandes proyectos en la Rusia de los zares, que empezaba entonces a industrializarse. Pero el estallido de la Primera Guerra Mundial retuvo en Rusia a Maillart con toda su familia, perdiendo su fortuna y casi su vida en la revolución comunista. En 1919 pudo regresar a Suiza, donde





5. LA EVOLUCION del proyecto de Maillart se advierte al comparar el puente de Valtschielbach (1925) (*arriba*) con el de Schwandbach (1933) (*abajo y página opuesta*). El primero, ubicado cerca de Donath en el sureste de Suiza, tiene estribos de piedra románicos, un arco de curvatura leve y un tablero con calzada recta, mientras que el segundo, escondido en los bosques del sur de Berna, carece de estribos de piedra, tiene un arco poligonal y su calzada se curva horizontalmente.



PUENTE DE ARCO CON TABLERO REFORZADO

al cabo de unos años volvió a trabajar en puentes de hormigón. Su más importante logro durante ese período fue el desarrollo del arco de tablero reforzado, cuyo primer ejemplo fue el puente de Flienglibach, construido en 1923. La idea surgió del análisis del efecto de cargas vivas (es decir, el peso del tráfico que circula por el puente) añadido a la carga muerta (el peso del propio puente).

Un puente de arco se asemeja en cierto modo a un cable invertido. El cable se curva hacia abajo cuando se le cuelga un peso y la tensión que en él se crea equilibra el peso suspendido. El puente de arco se incurva hacia arriba para soportar el tablero y la compresión ejercida sobre el arco compensa la carga muerta. Pero una vez que se haya fijado la forma que ha de tener el arco para ajustarse a la carga muerta, ésta no podrá ya cambiarse. Al añadir cargas vivas el arco del puente se deformará, especialmente si no son simétricas, como en el caso de un camión muy cargado que gravite sobre una de las mitades del arco. El arco habrá de tener resistencia y grosor capaces de soportar la flexión.

Pero, por razones estéticas, Maillart deseaba un arco más esbelto y halló la solución al unir el arco al tablero mediante paredes transversales (*véase la figura 4*). Como en tal estructura el arco y el tablero han de deformarse solidariamente, las fuerzas que originan la flexión (lo que los técnicos llaman el momento flector) se distribuirán entre el arco y el tablero en proporción a su rigidez relativa. Si el tablero es mucho más rígido que el arco, afirmaba Maillart, el momento flector actuaría casi enteramente sobre el tablero y el efecto sobre el arco sería despreciable. Así justificó la construcción de arcos lo más delgados que razonablemente se pudiera. Consiguió aumentar la rigidez del tablero del puente de Flienglibach añadiendo refuerzos de acero a los pretiles que van a ambos lados de la calzada y que sirven también de barandillas protectoras para el tráfico.

El análisis de Maillart predijo con exactitud el comportamiento del puente, como quedó demostrado por las pruebas a plena carga. Pero los afamados especialistas en obras públicas de Suiza, los profesores del Instituto Politécnico Federal, *alma mater* de Maillart, siguieron impugnando sus métodos durante el siguiente cuarto



6. LOS PUENTES POSTERIORES de Maillart reflejan su continua búsqueda de nuevas formas. El puente de Vessy, en las afueras de Ginebra, de 1936 tiene un arco interrumpido: su cara inferior termina en un punto de la clave del arco (*arriba, derecha*). En las paredes transversales en X que sustentan la plataforma se advierten rayas horizontales producidas por los encofrados de madera utilizados en su construcción (*arriba, izquierda*). En el puente de Lachen, de 1940, las rayas del encofrado destacan la esbeltez del arco (*abajo, derecha*) y su engrosamiento en las articulaciones inferiores (*abajo, izquierda*).

de siglo. Sus adversarios académicos consideraban que adoptaba un enfoque frívolo y peligroso e insistían en la necesidad de un riguroso tratamiento matemático basado en el estudio detallado de los influjos entre arco, paredes y tablero. Pero a menudo es difícil aplicar al mundo real un análisis que conduce a plantear un enorme número de ecuaciones simultáneas, aun en puentes pequeños. Tales problemas se resuelven hoy fácilmente por medios informáticos, pero el énfasis matemático puede alejar a los proyectistas de las ideas creativas.

Durante los diez años siguientes Maillart se dedicó a realzar la apariencia visual del arco de tablero reforzado. Podemos reconocer esta mejora comparando su puente de Valtschielbach de 1925 con el de Schwandbach de 1933. Ambos tienen arcos extremadamente finos, pero el primero se acerca más a las pautas habituales: tiene estribos románicos, un arco de curvatura suave y un tablero con calzada recta. Por el contrario, el puente de Schwandbach no tiene estribos de piedra, su arco es poligonal y la calzada de su tablero se curva horizontalmente (*véase la figura 5*). Estas innovaciones le aportan una forma asombrosamente original y convierten a esta estructura perdida en medio de los bosques suizos en uno de los más notables puentes de hormigón del siglo XX.

Ingeniería frente a arquitectura

La estructura más conocida de Maillart es el puente de Salginatobel, terminado en 1930. Su proyecto se basa en el arco de caja hueca del desaparecido puente de Tavanasa, si bien incorpora perfeccionamientos. Maillart suprimió aquí ciertas referencias a estilos más antiguos, como eran los estribos de piedra románicos en el Tavanasa. Ganó por concurso el contrato porque su proyecto era el de menor coste entre los 19 presentados. El puente y la calzada se construyeron por unos 700.000 francos suizos solamente, que equivaldrían hoy a unos 3,5 millones de euros. Salginatobel también fue el puente de vano más largo construido por Maillart, 90 metros, y tenía la situación más espectacular de todas sus estructuras, salvando a 80 metros de altura el desfiladero por donde corre el arroyo Salgina. Fue el primer puente de hormigón al que se asignó la calificación de hito histórico internacional de la ingeniería civil en 1991.

Maillart criticó su propia obra maestra de Salginatobel pocos años después, lamentando haber decidido redondear la cara inferior del arco en la proximidad de la clave. En su opinión, el redondeo era otra referencia innecesaria a un estilo anticuado. Corrigió ese error en su nuevo puente de Felsegg, en 1933, llamado de "arco interrumpido" por terminar su cara inferior en un punto de la clave del arco.

En 1936 finalizó Maillart otro puente notable, situado en Vessy, en los alrededores de Ginebra. En este puente perfeccionó su proyecto del arco interrumpido, desplazando las dos articulaciones de los estribos hacia el vano del puente e introduciendo un corte vertical en la articulación central, que resaltaba la discontinuidad del arco (*véase la figura 6*). Sorprende más todavía la forma en X de las paredes transversales que soportan el tablero. Este juego de formas crea una impresión viva, sin que las paredes transversales dejen por ello de satisfacer los requisitos estructurales del puente. La forma en X se ajusta a la distribución de los momentos flectores producidos por la dilatación térmica del tablero, que es máxima en los extremos superior e inferior de las paredes y casi nula a la mitad de su altura. Otra caracte-



rística interesante es la serie de rayas horizontales que han dejado marcadas en algunas paredes transversales los encofrados de madera utilizados en su construcción. Este trazado de rayas sobre las X recuerda el cuadro *Doppelzelt* (tienda doble) del pintor suizo Paul Klee, contemporáneo de Maillart.

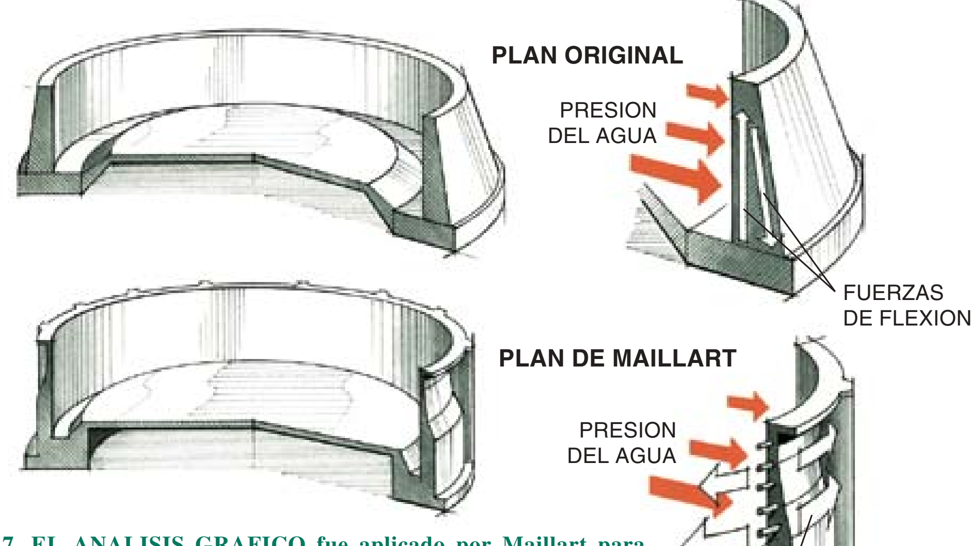
Los constructores suelen utilizar tableros de encofrado de formas adecuadas para dar textura y decoración a las superficies de hormigón descubiertas, con el resultado que a veces se denomina "hormigón arquitectónico". En 1939, un año antes de morir, Maillart incorporó configuraciones de encofrado a su proyecto del puente de Lachen, en la orilla sur del lago de Zurich. Una serie de rayas horizontales recorren la superficie del arco y las paredes verticales de la caja hueca situada encima (*véase la figura 6, abajo*). Esta disposición rayada destaca la esbeltez del arco y su engrosamiento en las articulaciones inferiores.

Como Maillart se cuidó tanto de la apariencia de sus puentes, nunca sintió la necesidad de recurrir a un arquitecto para completar los proyectos. Al principio de su carrera, con el fin de satisfacer a las autoridades locales y calmar su "atávica antipatía" frente a sus innovaciones, se vio obligado a colaborar con arquitectos en varios de los puentes que le encargaron. Pero Maillart trabajó solo en sus proyectos más importantes. No escondía un especial desdén por los esfuerzos de algunos arquitectos para dar un aspecto "monumental" a los puentes.

Maillart apreció, en cambio, que ciertos arquitectos y escritores especializados en arquitectura criticasen con sensibilidad el proyecto de sus puentes. Sin lugar a duda, fueron muchas veces los arquitectos los primeros que reconocieron la gran calidad de las estructuras de Maillart, antes de que lo hicieran sus colegas ingenieros. La sección de arquitectura del Museo de Arte Moderno de Nueva York dedicó en 1947 una importante exposición íntegramente a las obras de Maillart, cuando muy pocos ingenieros de estructuras americanos habían oído hablar de él.

Pero los ingenieros cayeron en la cuenta de que los puentes de Maillart eran algo más que estructuras de estética agradable en los años posteriores, pues técnicamente no habían sido superados. Tras la Segunda Guerra Mundial, el arco de caja hueca de Maillart se convirtió en el proyecto predominante para puentes de hormigón de vano largo y mediano en los Estados Unidos. Los profesores del Instituto Politécnico Federal de Suiza terminaron por impartir las enseñanzas de Maillart, que influyeron después en una nueva generación de proyectistas. Uno de los más destacados seguidores de Maillart es el ingeniero suizo Christian Menn, quien ha proyectado muchos puentes con arco de tablero reforzado desde los años cincuenta, técnica que los ingenieros americanos empezaron también a utilizar desde principios de los setenta.

Contemplado desde una perspectiva histórica, Maillart encaja muy bien en la tradición de ingeniería establecida por John Roebling, proyectista del puente de Brooklyn, y de Gustave Eiffel, creador de muchos puentes impresionantes y, por supuesto, de la Torre Eiffel. Para estos tres hombres, el proyecto ocupaba el primer lugar. Comenzaron con las formas que expresaban sus ideas sobre el arte estructural y utilizaron después sencillas técnicas analíticas para desarrollar sus proyectos. La obra de Maillart constituye una valiosa lección para los ingenieros actuales. Fue capaz de proyectar puentes y estructuras industriales de asombrosa originalidad porque estaba dotado de sensibilidad artística, de amplia experiencia en la construcción y de gran dominio de la técnica. Estas tres calidades deben ser inseparables en el moderno arte de la ingeniería de estructuras.



7. EL ANALISIS GRAFICO fue aplicado por Maillart para proyectar las bases de hormigón de dos grandes depósitos de agua en Saint Gallen, Suiza. El plan original exigía unas paredes de hormigón gruesas para resistir la presión del agua contenida en la estructura (*arriba*). Pero en los planos de Maillart la resistencia proviene de la tensión circunferencial creada en las varillas de acero empotradas en el hormigón, pudiendo así ser más delgadas las paredes (*abajo*).



8. LAS COLUMNAS de capitel abierto se funden suavemente con la losa de hormigón que tienen encima en el Edificio Filter de Rorschach, Suiza, construido por Maillart en 1912. Este proyecto permite que las columnas sustenten losas muy cargadas sin necesidad de vigas horizontales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ROBERT MAILLART: BRIDGES AND CONSTRUCTIONS. Max Bill. Artemis, 1969.

THE ARCHITECTURE OF BRIDGES. Elizabeth B. Mock. Ayer, 1972.

ROBERT MAILLART: BUILDER, DESIGNER, AND ARTIST. David P. Billington. Cambridge University Press, 1997.

Ian Stewart

Nudos al desnudo

El estudio de los nudos se ha convertido en un campo importante de investigación matemática durante los cien últimos años. Toma en ellos cuerpo una de las grandes cuestiones de la topología: ¿cuáles son las distintas formas de situar una forma geométrica dentro de otra? En el caso de los nudos las dos formas son un círculo —que puede representarse por un bucle cerrado de cuerda— y la totalidad del espacio tridimensional. Para los topólogos un nudo no es más que un círculo que ha sido sumergido en el espacio tridimensional de manera tal que no es posible desenredarlo mediante una deformación continua del espacio que lo circunda.

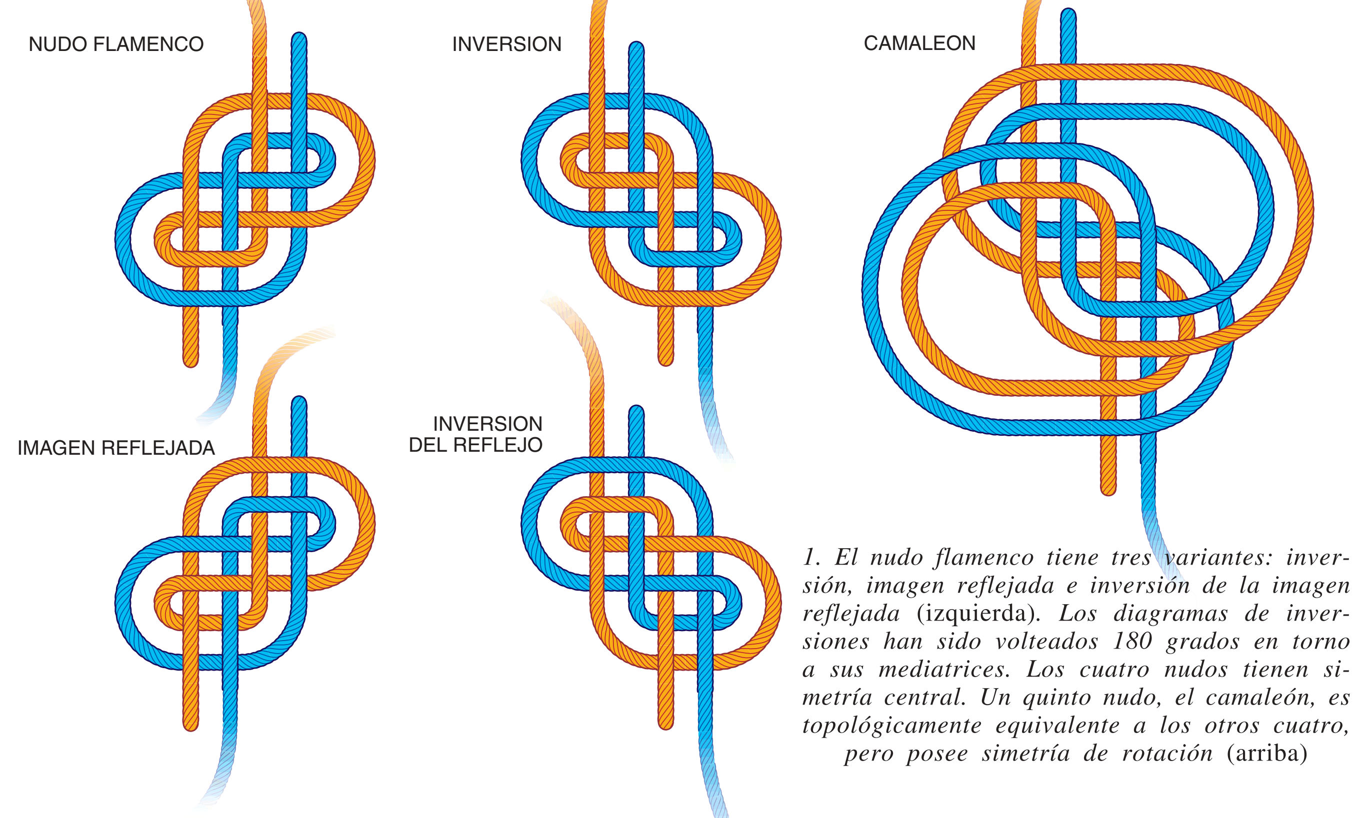
Esta descripción dista bastante de la experiencia cotidiana. Los trozos de cuerda del mundo real tienen extremos y para deshacer un nudo lo que deformamos es la cuerda, no el espacio que lo rodea. Aunque la definición topológica capture la "nodalidad" de los nudos, otros aspectos no son tan reducibles a formulación topológica. Un caso claro al punto es el problema de anudar dos trozos de cuerda para formar una sola, más larga. El requisito principal es que el nudo no se deslice ni se deshaga al tirar de los extremos de la cuerda. En este caso intervienen también la fricción superficial y el material de la cuerda, por lo que la tarea requiere un enfoque diferente.

Algún matemático se ha enfrentado a la cuestión y ha desarrollado los comienzos de una teoría para tales nudos. Así es la concebida por Roger E. Miles, de la Universidad Nacional de Australia en Canberra, que se expone en su poco ortodoxo libro *Symmetric Bends* (World Scientific, 1995). El objetivo principal de Miles es la clasificación sistemática de la geometría de nudos, gazas y presillas, lo que permitiría la búsqueda de otros nuevos que tuvieran propiedades deseables, como la resistencia al deslizamiento por efecto de la tensión.

El nudo más sencillo y conocido es el rizo o nudo llano (*véase la figura 2*). Vamos a representar un cabo como de color naranja y el otro como azul en las ilustraciones adjuntas. Cada cuerda tiene un extremo "libre" —la punta que sobresale del nudo— y un extremo "útil", que representa la porción principal de la cuerda y se indica por medio de una línea que se difumina. En el diagrama del rizo vemos dos tipos de cruzamientos: azul sobre naranja y naranja sobre azul. En nudos más complejos puede que haya también cruzamientos azul sobre azul y naranja sobre naranja.

Es frecuente confundir el nudo llano con otra variante defectuosa, a la que a veces se llama "nudo de la abuela". Ambos tipos quedan transformados en nudos topológicos corrientes si se conectan los extremos libre y útil de cada una de las cuerdas. (Todo se cierra en bucles en la teoría de nudos tradicional.) Estos dos nudos corrientes no tienen variantes cercanas, pero hay otros dos que se les parecen mucho, pues no difieren más que en la elección del extremo que será libre. Se trata de los nudos de ayuste y "de ladrón".

Estos cuatro nudos elementales son los que tienen diagramas más sencillos, es decir, los de menor número

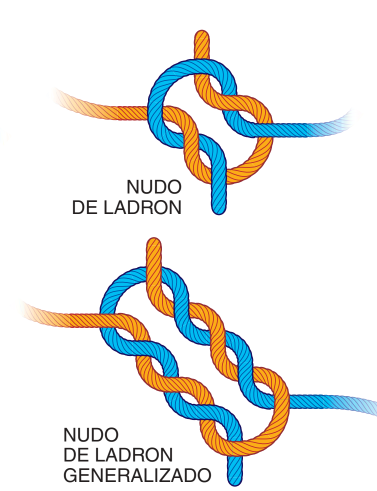


1. El nudo flamenco tiene tres variantes: inversión, imagen reflejada e inversión de la imagen reflejada (izquierda). *Los diagramas de inversiones han sido volteados 180 grados en torno a sus mediatrices. Los cuatro nudos tienen simetría central. Un quinto nudo, el camaleón, es topológicamente equivalente a los otros cuatro, pero posee simetría de rotación* (arriba)









2. Los cuatro nudos elementales (hilera superior) *tienen pocos cruzamientos y pueden deshacerse fácilmente. El nudo de ladrón generalizado* (arriba) *es más seguro, por tener más cruzamientos*

de cruzamientos. La fricción, que impide que las cuerdas se deslicen y se desanuden, se genera, hasta cierto punto, en los cruzamientos. Lo inmediato sería esperar que los nudos más complicados fueran más seguros, pero no siempre sucede así. La seguridad del nudo depende también del modo en que la secuencia de cruzamientos encaje en tres dimensiones. Los cuatro nudos elementales son todos inseguros y tienden a deshacerse al tirar de las cuerdas o al ser perturbados de cualquier otra forma. Resulta instructivo cómo se deshacen: una de las cuerdas se endereza, aunque no sea del todo, y luego se escurre por entre los bucles de la otra.

Los nudos elementales poseen otra propiedad grata: su simetría. Si al diagrama del nudo llano se le da un volteo diagonal —es girado 180 grados alrededor de un eje consistente en la diagonal que va desde el ángulo inferior izquierdo del diagrama hasta el superior derecho— aparece el mismo diagrama, salvo que los colores resultarán intercambiados. Lo mismo vale para el nudo de la abuela. El nudo de ayuste tiene simetría de rotación, ofreciendo el mismo aspecto, excepto en el color, si se le hace girar 180 grados en torno a un eje que saliera perpendicularmente de la página. Y el nudo de ladrón tiene simetría central: si se efectúa sobre el diagrama una simetría respecto al centro del nudo, que transforme cada punto de coordenadas x, y, z en otro de coordenadas $-x$, $-y$, $-z$, el nudo tendrá el mismo aspecto que el primero, excepto por los colores. Se pueden observar de primera mano estas simetrías anudando dos cuerdas reales de distinto color. Hay que cerciorarse de apretar los nudos con cuidado y por igual.

Basándose en los tres tipos de simetría recién descritos —volteo diagonal, giro, simetría central— Miles ha desarrollado un formalismo para el estudio de nudos que poseen simetrías e incluso para la invención de otros nuevos. Por ejemplo, por generalización del nudo de ayuste se engendra toda una familia de nudos (*véase la figura 2, abajo*). En el espacio tridimensional pueden efectuarse además otras tres operaciones de simetría. La primera es la simetría respecto a un plano, o simetría "especular" (respecto a un espejo): en un diagrama bidimensional se puede apreciar el efecto de esta operación invirtiendo los cruces de cada intersección. La segunda es el intercambio de colores, que consiste simplemente en permutar los colores naranja y azul. Y la tercera es la inversión, que supone intercambiar los extremos útil y libre de color naranja e intercambiar al mismo tiempo los extremos útil y libre de color azul.

El espécimen más preciado entre los nudos simétricos es el llamado nudo flamenco. En las cuatro primeras ilustraciones de la figura 1 podemos ver el nudo, su imagen reflejada, su inversión y la inversión de la imagen reflejada. Los cuatro nudos son centro-simétricos. En la quinta ilustración se muestra un nudo con diferente simetría, pues tiene simetría de rotación. A pesar de lo cual los cinco nudos son topológicamente equivalentes; es decir, cada uno puede ser transformado en cualquiera de los otros mediante manipulaciones sencillas. Para verlo, lo más fácil es manipular el quinto nudo, al que Miles llama "camaleón", y transformarlo en cada uno de los demás. No privaré a los lectores del placer de hallar cómo.

El libro de Miles incluye un catálogo de 60 nudos simétricos. Ahora bien, ¿existe un nudo óptimo para ayustar dos trozos de cuerda? La respuesta de Miles es: "En realidad, no." La resistencia al deslizamiento y a los tirones no es el único criterio de calidad de un nudo; entre otras cualidades deseables se cuentan la facilidad de formarlo o de deshacerlo, la posibilidad de que los extremos libres sean más o menos largos y de que su aspecto resulte estéticamente grato. Miles invita a los lectores a darle cuenta de sus propios descubrimientos, que él podría incluir en una futura edición, pues, según dice, el inventor de un nudo nuevo tiene la prerrogativa de darle nombre. En cierto modo es como descubrir nuevos cometas o novas.

Acuse de recibo

En respuesta a "Cuadrados mágicos maxiperfectos" [febrero de 2000] he recibido dos artículos sobre rectángulos mágicos, de Thomas R. Hagendorf, publicados en *Journal of Discrete Mathematics* (vol. 207, números 1-3, 28 de septiembre de 1999). Un rectángulo mágico es una formación o matriz de dimensiones $m \times n$ en la que figuran todos los números enteros desde el 1 hasta el producto de m por n. La suma de los números que componen cada fila es siempre la misma y lo mismo ocurre con las columnas, pero una y otra suma no tienen por qué ser necesariamente iguales. No se consideran las diagonales. Los matemáticos conocen desde hace mucho la existencia de rectángulos mágicos cuando m y n tienen igual paridad (ambos son pares o ambos impares), siempre que sean mayores que 1 y que no sean ambos iguales a 2.

Los artículos de Hagendorf generalizan esta idea a mayor número de dimensiones y demuestran que si todos los lados de una matriz multidimensional de enteros son pares (lo que ocurre, por ejemplo, con una matriz de $2 \times 4 \times 6$), entonces ha de existir un rectángulo mágico. La demostración es mucho más difícil en el caso impar. Ni siquiera se sabe si existe un rectángulo mágico de dimensiones $3 \times 5 \times 7$. Aquí lanzo, pues, el guante a mis lectores: ¿será posible disponer los números de 1 a 105 en una formación de $3 \times 5 \times 7$ de modo que todas las hileras horizontales tengan la misma suma, todas las columnas verticales tengan la misma suma y todas las filas "en profundidad" tengan la misma suma? Estas tres sumas pueden ser diferentes (¡tienen que serlo!).

—*I. S.*

Sarah Simpson

Escape y supervivencia

Tras el éxito de los cuatro primeros vuelos de prueba de la lanzadera, los astronautas enviados al espacio lucían unos monos azul celeste que apenas eran algo más que unos cascos de motorista glorificados. Gracias a la presurización de las cabinas de la tripulación, fueron los primeros que pudieron volar sin los engorrosos e incómodos trajes presurizados que tuvieron que soportar sus antecesores. Si se producía una emergencia, se confiaba en que pudieran llevar la nave hasta la pista de aterrizaje más próxima y aceptable; no podían escapar de la nave.

En 1986, tras la horrorosa explosión del *Challenger*, la NASA ordenó a sus ingenieros que previesen métodos de escape para las futuras tripulaciones. También se restableció el uso de un traje de presión, que protege al usuario del fuego, la inmersión en agua fría y la súbita descompresión de la cabina. (Tal traje admite aire o lo expulsa automáticamente en función de la presión del aire exterior.) Y así nacieron los resplandecientes indumentos de color rubí que ahora visten los astronautas en los despegues y reentradas. Lo chillón del traje es una característica importante para la supervivencia, al igual que lo son los paracaídas, el bote salvavidas, las pistolas de señales y demás dispositivos que incorpora, pues el color está pensado para que llame la atención de quienes exploren las olas en busca de astronautas a la deriva.

La David Clark Company, de Worcester (Massachusetts), fabrica estos trajes, cuyo nombre oficial es el de traje de salvamento de tripulante avanzado. Ninguna misión ha sufrido una emergencia que requiriera el uso de este equipo, pero la armada estadounidense, que suministra los paracaídas, hace pruebas de lanzamiento con los trajes cada dos años.

EL LANZAMIENTO EN PARACAIDAS es un último recurso, que no debe emplearse más que si el aterrizaje de la lanzadera resulta imposible. Teóricamente en tales circunstancias los astronautas igualarían la presión de la cabina con la del exterior cuando estuviesen a 12.000 metros y se quitarían los cinturones de sujeción. El tripulante encargado de ello haría saltar la escotilla de salvamento a 9000 metros y cada uno de los astronautas engancharía una argolla D que lleva en el traje a una barra telescópica de salvamento de 2,6 metros de largo. La argolla iniciaría la secuencia del paracaídas cuando el astronauta se hubiese separado lo suficiente de la nave. Cuando el casquete principal del paracaídas saliese de la mochila, activaría una radiobaliza de posición para la localización por satélite (SARSAT). Al amerizar, el paracaídas se desprendería automáticamente, se inflarían un chaleco salvavidas y un bote salvavidas verde y se esparciría el colorante marino verde.

EL BOLSILLO DEL EQUIPO DE SUPERVIVENCIA contiene linternas, una luz estroboscópica, un espejo de señales, bengalas y píldoras contra el mareo.

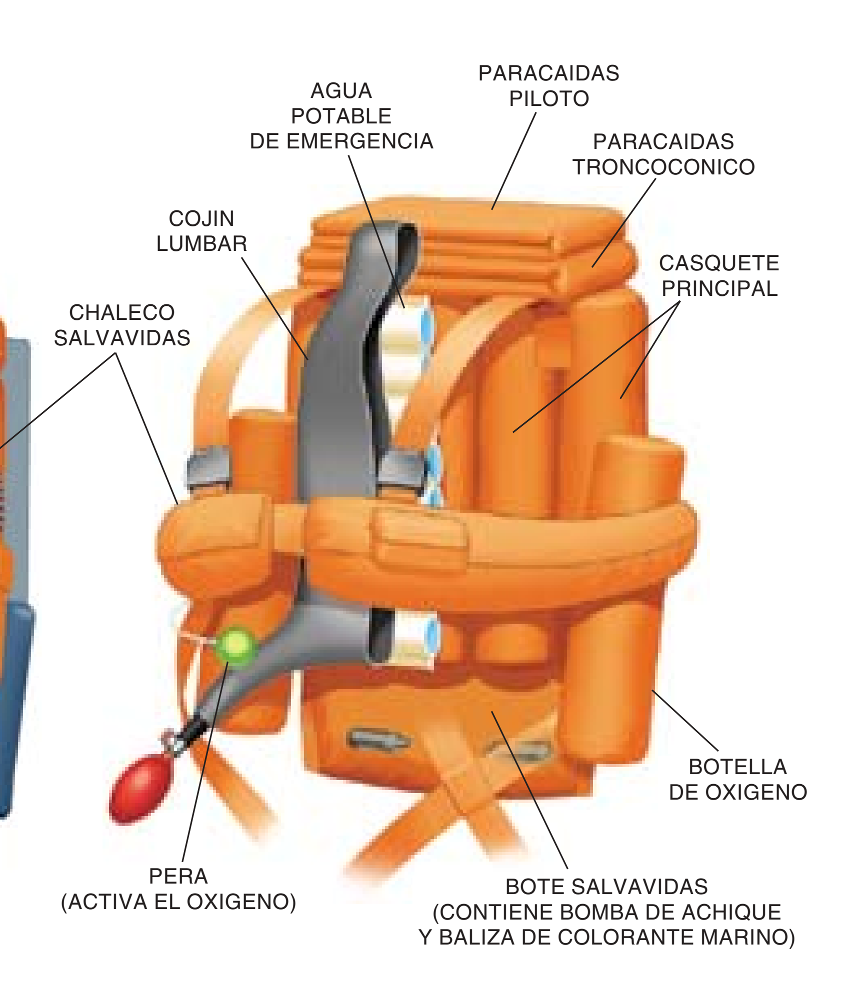


CAMBRAY
RECIPIENTE DE GAS
CUBIERTA EXTERNA
CONFINADOR DEL TRAJE ANTIGRAVEDAD
CAMARA DE PRESION ANTIGRAVEDAD

LA MOCHILA DEL PARACAIDAS hace de respaldo del astronauta en la lanzadera, pero permanece sujeta a él en caso de salto de emergencia. La mochila y su atalaje se proyectaron teniendo presente la posibilidad de que el usuario estuviera incapacitado. Tanto los paracaídas como el chaleco salvavidas y el bote se despliegan automáticamente.

EL MATERIAL DEL TRAJE DE EMERGENCIA incluye un recipiente de gas hecho de Gore-Tex transpirable y confinado por una cubierta de lona de Nomex. El Gore-Tex especial mantiene aire a presión dentro del traje y el Nomex protege contra el fuego y la abrasión. Durante el retorno a la gravedad los astronautas llevan también un traje antigravedad, que les oprime las piernas para que la sangre no se les agolpe en ellas.

UNIDAD DE COMUNICACIONES



¿SABIA USTED ...

- Que antes de que los ingenieros de la NASA inventaran la barra telescópica de salvamento, el lanzamiento en paracaídas se efectuaba con cohetes tractores? El astronauta se tumbaba de espaldas y sujetaba un cabo de su traje a un cohete. Cuando el cohete salía por la abertura de escape, se llevaba con él al astronauta con una fuerza doce veces la de la gravedad.

- Qué hacer con un tripulante que haya vivido ingrávido en una estación espacial durante tanto tiempo que sus músculos se hayan vuelto gelatina? Para prepararse ante tal eventualidad los tripulantes de las lanzaderas practican el lanzamiento en paracaídas mientras presencian el de un traje relleno de maíz que emula a un astronauta pesado y fláccido.

- Que la primera versión del traje de salvamento era mucho más agobiante y más voluminosa que la actual, dado que las capas que hoy son de Gore-Tex se hacían de nailon revestido de uretano, que no transpiraban?

LIBROS

Técnica

y sociedad

SCIENCE AND TECHNOLOGY IN WORLD HISTORY, por James E. McClellan III y Harold Dorn. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1999. **BIOGRAPHICAL DICTIONARY OF THE HISTORY OF TECHNOLOGY.** Dirigido por Lance Day y Ian McNeil. Routledge; Londres, 1998.

ANCIENT EGYPTIAN MATERIALS AND TECHNOLOGY. Dirigido por Paul T. Nicholson y Ian Shaw. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **CONCERNING BEGINNINGS AND DISCOVERIES. POLYDORE VERGIL'S DE INVENTORIBUS RERUM.** Introducción, notas y glosario de Beno Weiss y Louis C. Pérez. De Graaf Publishers; Nieuwkoop, 1997.

FROM STEAM TO DIESEL, por Albert J. Churella. Princeton University Press; Princeton, 1998. **INDUSTRIAL ESPIONAGE AND TECHNOLOGY TRANSFER. BRITAIN AND FRANCE IN THE EIGHTEENTH CENTURY,** por J. R. Harris; Ashgate; Aldershot, 1997.

THE LIFE AND TIMES OF A. D. BLUMLEIN, por Russell Burns. Institution of Electrical Engineers; Stevenage, 2000. **A RADAR HISTORY OF WORLD WAR II. TECHNICAL AND MILITARY IMPERATIVES,** por Louis Brown. Institute of Physics Publishing; Bristol, 1999.

Nadie cuestiona hoy que la técnica, en su acepción depurada, sea aplicación de los principios de la ciencia, cuyo desarrollo ulterior estimula. Un maridaje que, sin embargo, apenas cuenta con siglo y medio de existencia, según mantiene *Science and Technology in World History*; hasta entonces, la técnica dependía más de la innovación de artesanos hábiles que de la especulación teórica. Tesis que abona *Biographical Dictionary of the History of Technology*, donde se describe la vida y obra de un millar largo de inventores, descubridores y empresarios. (Tenaz en una inveterada injusticia, omite las aportaciones españolas de Salvá, Torres Quevedo, Monturiol, Torroja o Goicoechea; si cita a Fernando Casablancas, Juan de la Cierva y José Trueta es por la relación directa que tuvieron con Inglaterra. Del primero anota las patentes sobre mejora del rendimiento de máquinas hiladoras en la isla; más externa es la aproximación a la historia del autogiro y su inventor. De Trueta recuerda su técnica quirúrgica de restañamiento de las heridas de guerra fundada en la limpieza, excisión del tejido no viable, drenaje e inmovilización.)

A la destreza innata de los animales, algunos primates añaden algún acierto que transmiten a sus congéneres y descendencia. Hay chimpancés que cazan termitas hurgando los nidos con un palito. Imo, hembra de una colonia de macacos del Japón, logró una doble hazaña. Descubrió que, para limpiar la arena de las patatas arrojadas en la playa, le convenía más lavar el tubérculo en el mar que frotarlo con la mano; y para separar el arroz de la arena, mejor que recoger grano a grano era echar el puñado mixto al agua, donde la arena se hunde y el cereal flota.

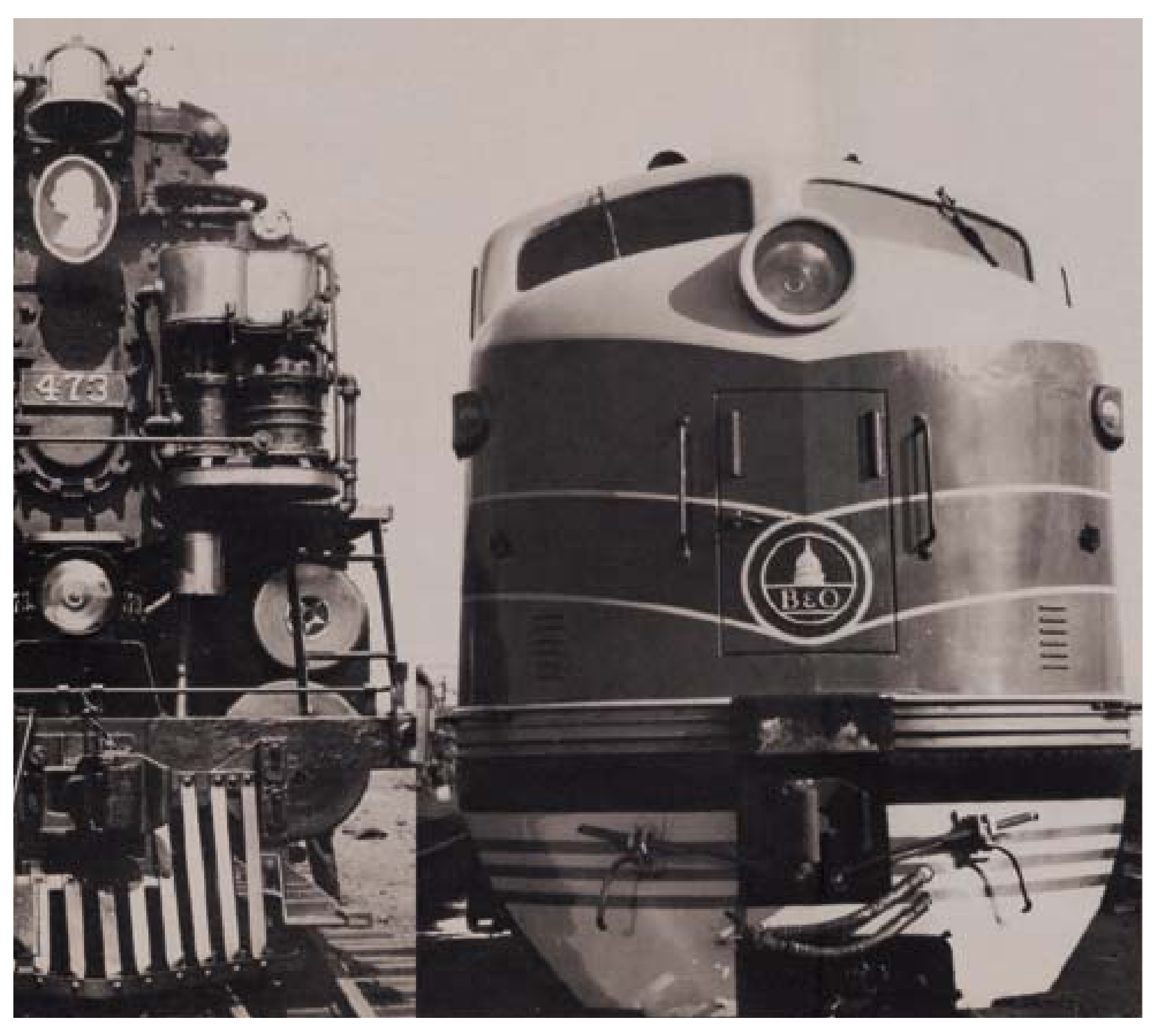
Pero la creación de útiles constituye un distintivo de *todas* las sociedades humanas desde que, hace dos millones de años, *Homo habilis* tallaba cantos o desbastaba ramas y cuernas para varear, prender o matar. El control del fuego representó una innovación clave. Aportaba calor y permitía la emigración hacia zonas más frías. Con su luz, el fuego prolongaba la actividad diaria y en la obscuridad de las cuevas. Protegía contra la agresión de los animales y posibilitaba la cocción de su carne, que aliviaba el esfuerzo requerido para la digestión. En el fuego se endurecían las herramientas de madera y a su lumbre se entablaban lazos sociales.

Al forrajeo errático de *Homo sapiens sapiens*, ducho ya en trenzar cuerdas y redes, tensar arcos, afilar flechas y doblar anzuelos, le sustituyó la agricultura. Centeno y legumbres se domesticaron, en Tel Abu Hureyra 1, hace unos 10.000 años. La acumulación de excedentes fomentó los asentamientos. Aunque aparece en el Neolítico la metalurgia, sus gentes no forjaron reinos ni construyeron palacios. Vino ese avance con la revolución urbana, abastecida por una agricultura fundada en redes de gestión del agua y en arados tirados por bueyes.

Sobre todos los reinos emergentes emerge el país de los faraones, cuyo dominio de las materias primas y técnicas transformadoras se hace explícito en *Ancient Egyptian Materials and Technology*, imponente renovación del tratado de Alfred Lucas. Abarca los cinco milenios de los períodos predinástico y faraónico. Del 5500 al 322 a.C. se asiste a un proceso gradual de cambio técnico; las industrias del calcolítico dejan paso a las innovaciones de las edades del Bronce y del Hierro en cantería, construcción de templos y pirámides, conservación de la carne y pescado, soplado del vidrio y cocción de la loza, horneo del pan, destilación de la cerveza, fabricación de perfumes y momificación de animales y personas.

La cantería del período faraónico trabajó calizas y areniscas para los monumentos ceremoniales y funerarios. ¿Con qué herramientas? Por las muescas deducimos que usarían, primero, piquetas o hachas; más tarde, escoplo y maza. Emplearon formones de cobre y, más tarde, de cobre y bronce. Para la extracción del granito aprovecharían los cortes de la cantera y, con martillos de dolerita, irían moldeando los bloques, que transportarían a lo largo de caminos especiales.

Los egipcios, muy aficionados a las gemas de adorno, engarzaban amatistas, cornalinas, granates, hematites, jaspes, malaquitas, ágatas, cristales de roca, serpintinitas, lapislázulis, olivinas y turquesas. Dominaron los tintes, obtenidos en su mayoría de sustancias inorgánicas, razón última de la extraordinaria frescura con que se han conservado. Para embellecimiento de los ojos empleaban pirolusita, aunque la fuente principal del negro era el carbón. Obtenían el azul de una mezcla de silicio, cobre y calcio; de una combinación con hematites sacaban el marrón; el verde, de wollastonita y cloruros de sodio y potasio. El rejalgar (un sulfuro de arsénico) les procuraba el naranja y rojo, aunque este último procedía tam-



La locomotora de vapor (izquierda) *y la locomotora diesel* (derecha) *han constituido el emblema del progreso de los siglos* XIX *y* XX

bién del ocre, fuente del púrpura y del amarillo. Para el blanco contaban con calcita y yeso abundantes.

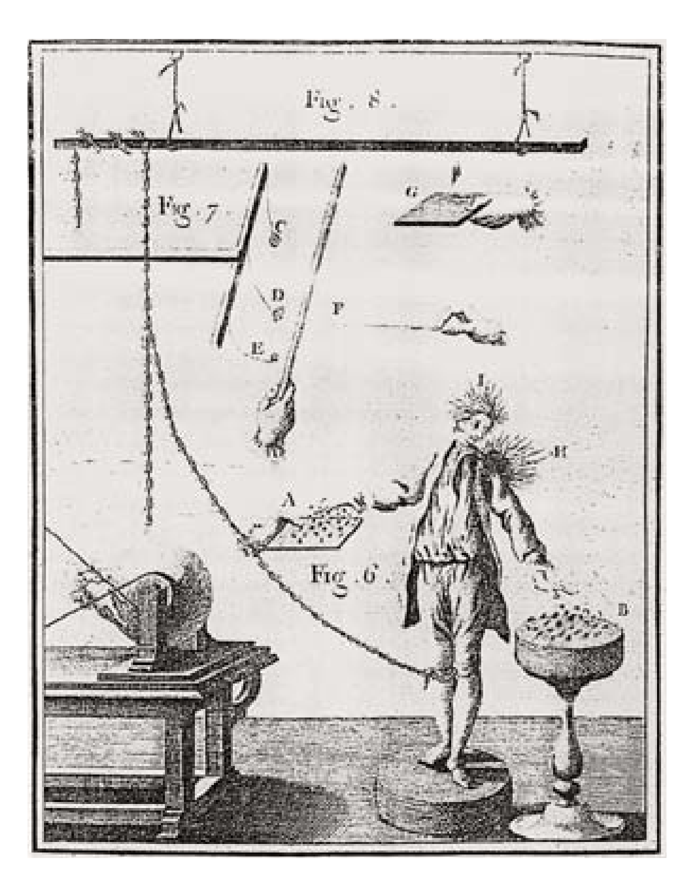
Las artes mecánicas despuntan en el helenismo. Arquímedes sometió a ley los principios de la palanca, la cuña, el tornillo, la polea y el torno. Al analizar la balanza, se esbozan las relaciones del peso; y fundados en ese conocimiento se dice que Ctesibius de Alejandría, Filón de Bizancio y Herón de Alejandría proyectaron "máquinas maravillosas" que abrían las puertas del templo. El tornillo de Arquímedes, inventado en el siglo III a. C., servía para elevar agua. Pero no hubo técnicos en el mundo clásico occidental que hicieran sombra a los romanos, a Vitrubio y Frontino.

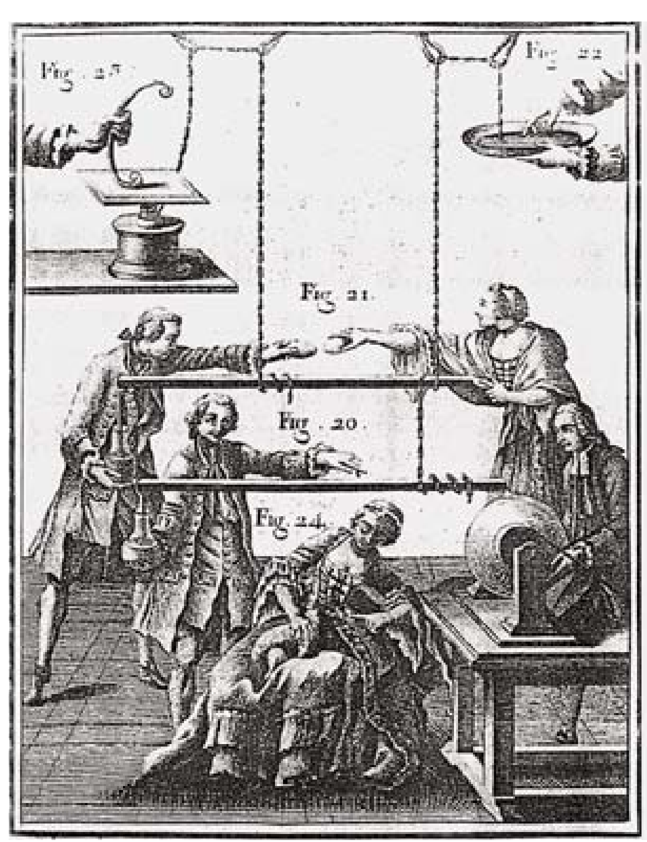
En Oriente, la civilización china desarrolló una escritura ideográfica que cuenta con más de 5000 caracteres hacia el siglo IX a.C. Y más allá de esta o aquella invención (la carretilla, el carro, la laca, la pólvora, la porcelana, la sombrilla, el sedal de pescar, los puentes colgantes, etcétera), China irá por delante en el beneficio de los minerales, los talleres de seda, los hornos de cerámica y los molinos de papel.

La Europa medieval se transforma con la introducción del arado articulado con rejo de hierro y la sustitución del buey por el caballo con collar como animal de tiro. Los équidos, más robustos en su región frontal (en una proporción de 3:2), crecen y viven más que los bueyes. El campo adopta el sistema de triple rotación. La guerra cambia con la invención del cañón y, luego, de la bombarda.

Contra el postrer ingenio de guerra, hecha para la destrucción, escribió el autor de *De inventoribus rerum*. No se trata de un repaso histórico riguroso, aunque encierra un interés cierto sobre la concepción humanística de la técnica antes del gran corte científico que supuso el siglo XVI. Polidoro Vergilio, nacido en torno a 1470 en el seno de una familia rica y formado en las universidades de Padua y Bolonia, remonta los descubrimientos a la antigüedad clásica y preclásica.

Para un latinista, "inventor" no es sólo el que idea algo por vez primera, sino también el que da con un camino o salida a una aporía. Vergilio aúna los descubrimientos e invenciones por temas. A la pregunta





Exhibiciones públicas de la electricidad estática en el siglo XVIII. *(Grabados de las* Lecciones de física experimental*, del Abbé Nollet.)*

de quién inventó las letras del alfabeto y las llevó al Lacio, le sigue otra sobre el origen de la gramática, "ciencia que promueve el conocimiento mejor que cualquier otra de las artes liberales". A propósito de éstas le interesan la procedencia y el creador de los instrumentos musicales. Evita cualquier explicación causal espuria; sería creer en mitos apelar a la acción de los astros, como los que dicen, denuncia, que la luna produce hombres blancos o Saturno negros.

A los egipcios, progenitores de la geometría, les debemos también la división del año lunar; al inventor anónimo del reloj —solar, de agua o de arena—la partición horaria. Pero, amén de esos antañones, prosigue Polidoro, hay otros recientes, relojes que marcan ininterrumpidamente las 24 horas. Vibra ante la invención casi coetánea de la imprenta de caracteres móviles. Puesto que la inteligencia del hombre crece día a día con la masa de libros que se publican, y puesto que gracias a ello florece el saber por doquier, sería una grave injusticia, afirma, pasar en silencio esa maravilla. Benéfica para la humanidad ha sido también la invención de la brújula que orienta a los marinos. Se percata de que el estribo, ausente en las esculturas de Roma y en los textos, tiene que ser invención reciente.

La revolución científica debe mucho al telescopio construido en 1608 por Hans Lipperhey. Oída la noticia, Galileo se aprestó a pulimentar sus propias lentes de vidrio de Venecia. Contempla miríadas de nuevas estrellas y una luna montañosa, que desmiente la esfericidad perfecta de los aristotélicos. La experimentación evoluciona de divertimento esporádico a práctica sistemática. Newton exhibe la descomposición de la luz en rayos de diferente grado de refracción. Hooke generaliza, tras repetidos ensayos en muelles, la relación de proporción entre la fuerza aplicada a un cuerpo y la deformación en él inducida (ley de Hooke). Pero no hay experimento sin buenas herramientas. En el siglo XVII, una teoría de profesionales y aficionados se volcaron sobre telescopios, microscopios, termómetros, escalas, redomas, barómetros, relojes y, más tarde, máquinas de electricidad estática. Esos ingenios técnicos extendían la capacidad perceptiva de los sentidos y se convirtieron en catapulta del avance del conocimiento.

En el siglo XVIII el progreso técnico transforma el modo de vida, la sociedad se industrializa. La fuerza laboral se traslada del campo al taller. Tras la crisis maderera provocada por la tala acelerada de los bosques, el descubrimiento del carbón de coque por Abraham Darby en 1709 alivió la escasez energética. Para facilitar el beneficio del carbón, Thomas Newcomen inventó en 1712 la máquina de vapor, mejorada a mediados de siglo por John Smeaton y James Watt. El prototipo de éste condensaba el vapor en una vasija independiente, que mantenía fuera del cilindro; al eliminar el calentamiento y enfriamiento alternos de los modelos precedentes, el ahorro en carbón era sustancial.

Francia, en pugna intermitente con Inglaterra, no quiere quedarse atrás en el progreso; si preciso fuere, robándolo. De esa vía de apropiación impulsada por el propio estado se ocupa *Industrial Espionage and Technology Transfer*. Aunque para poner coto se dictó la ley británica de 1719, que afectaba a telares, talleres de relojería, acerías, cristalerías, destilerías, cuchillerías y alfarerías, no pudo frenarse el flujo de maestros artesanos, la venta de ma-

quinaria y la copia de métodos ingleses de producción. No era fácil cerrar una sangría que había abierto en 1703 el financiero británico John Law, quien propuso al gobierno francés el desarrollo industrial de las regiones de Lyon, Forez y el Beaujolais. Gracias al espionaje, los franceses obtuvieron —a menudo con notable celeridad— cualquier técnica que deseaban, si bien los resultados fueron, a la postre, decepcionantes.

Las estancias de los enviados franceses duraban meses e incluso años. Jars y Faujas de Saint-Fond detallaban al final los pormenores de las partes principales del proceso fabril. Le Turc, ingeniero naval y experto en maquinaria textil, estuvo ocho años dibujando con sumo detalle cualquier telar al que pudiera acceder. Francia no fue, sin embargo, el único país interesado. De Suecia y Dinamarca llegaron observadores, bien preparados desde el punto de vista técnico, para conocer los procesos metalúrgicos, la manufactura del alumbre o las entrañas del motor de Newcomen.

Y se sumaron los austríacos. Maestros ingleses y holandeses habían sido reclutados en 1715 para las fábricas de algodón de Waldstein. Más tarde, desde la embajada en Londres, se buscaron metalúrgicos para las acerías de Graz. En la legación se sobornó a Thomas Rosthorn para que dirigiera una fábrica de botones y hebillas, con toda la maquinaria precisa.

El progreso a lo largo de los siglos siguientes tuvo por enseña la máquina de vapor, que multiplicó el tráfico marítimo y, más tarde, el terrestre. Desde 1830 hasta mediada la centuria siguiente, las locomotoras de vapor simbolizaron la aventura de los raíles y el poder industrial de la economía. Aunque falta por escribir el gran tratado sobre la locomotora, los interesados en economía industrial pueden leer con provecho *From Steam to Diesel.* Con este arquetípico estudio del caso se pretende ilustrar la respuesta de un sector industrial entero a un cambio técnico radical: la sustitución de la locomotora de vapor por la máquina diesel. Dos compañías sin experiencia ni vínculos con la producción de locomotoras —General Motors y General Electric— se introducen en un mercado dominado por American Locomotive Company (ALCo), Baldwin Locomotive Works y la Lima Locomotive Works, firmas sólidamente establecidas. Ante la competencia entablada, el tamaño y los beneficios de ALCo y Baldwin se desplomaron. En 1917, la primera ocupaba el número 52 en el ranking industrial, y la segunda el 62. En 1948, habían descendido al 145 y 143, par ir perdiendo puestos en los años siguientes.



Alan Dower Blumlein (1903-1942)

Hasta finales del XIX el motor diesel no empezó a adquirir su forma moderna, gracias en buena medida a los esfuerzos de Rudolf Diesel. Sabía éste que los motores de compresión-ignición podían alcanzar un rendimiento térmico del 73 por ciento, frente al 6-10 por ciento que alcanzaban las máquinas de vapor y al 18-22 por ciento de los motores de gasolina por chispa (motor de Otto). En 1892 Diesel patentó su todavía teórico diseño de motor. Cinco años después presentaba su prototipo real.

El autor atribuye la drástica sustitución de la locomotora de vapor por la diesel a nuevos hábitos empresariales y procesos de producción. No se trata sólo de suplantar el servicio ajustado a las necesidades de cada cliente por métodos de fabricación en serie. La máquina diesel triplicaba el rendimiento térmico de su contrincante. Además, a diferencia de las locomotoras diesel, las de vapor exigían grandes cantidades de agua, de la que no siempre resultaba fácil aprovisionarse en las zonas áridas. Viniera de donde viniera, siempre había que proceder a su mineralización antes de verterla a las calderas. Debido a su peso, elevada presión de las calderas, producción enorme de calor y fáciles desajustes de las partes acopladas, las locomotoras de vapor requerían la inspección y reparación a intervalos regulares. Cada año los ferrocarriles debían gastar un 25 por ciento del coste original de la locomotora en su mantenimiento. Los frenos dinámicos, usados en el descenso de pendientes, provocaban una enorme inercia del tren, que podía convertir los motores de tracción del diesel en generadores de resistencia. El calor resultante se disipaba a través de las rejillas del techo de la locomotora. Esa propiedad reducía sustancialmente el desgaste de los frenos. En resumen, si el éxito de la industria de las locomotoras dependió en un comienzo de la innovación del producto, la innovación de los procesos termina por adquirir mayor importancia.

Ciencia e industria habían comenzado a andar juntas en el siglo XIX. La teoría de la electricidad promovió nuevas aplicaciones fabriles. Apoyándose en el descubrimiento de la inducción magnética por Michael Faraday en 1831, Charles Wheatstone y un colaborador suyo inventaron el primer telégrafo eléctrico en 1837, que se constituyó en auxiliar imprescindible de los ferrocarriles, apro-

Entre economía y física

Dinámica caótica en economía. Teoría y aplicaciones, por Andrés Fernández Díaz. McGraw-Hill; Madrid, 2000.

Se ha dicho que la economía no puede equipararse con la física porque en ella los experimentos no son repetibles. Olvidan quienes ello afirman que la astrofísica forma parte de la física. También se olvidan de que hay datos suficientes como para tratar de entender series temporales económicas, lo mismo que Newton hizo con los datos astronómicos publicados por Kepler y otros. Y, finalmente, desconocen que ya hace algunos decenios que los físicos saben que hay muchos casos en que al repetir un experimento pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, de funcionamiento o de contorno, dan lugar a resultados drásticamente diferentes.

Esta *Dinámica caótica en economía* es la segunda y muy revisada edición de *La economía de la complejidad*, publicada en 1994. Nada que ver con el *Economics* de P. A. Samuelson. Parte de la polémica sobre el determinismo y el indeterminismo en física y economía, lo que le lleva a pasar revista a las teorías de la complejidad, a su relación con la economía y a la economía sinergética. Su culminación, la tercera parte, se centra en la explicación del comportamiento del mercado de capitales en España.

En diez capítulos, tres apéndices (dos sobre ecuaciones diferenciales ordinarias, parciales y estocásticas), un epílogo y abundante bibliografía, el autor nos empapa con los recientes desarrollos de la ciencia de lo alineal, de los bucles de realimentación hacia atrás y hacia adelante, de la complejidad y de los efectos cooperativos o sinérgicos (el total se muestra como algo superior a la suma de las partes), de la probabilidad y del caos determinista.

Aunque en el mercado internacional ya hay algunas monografías de parecido intento, me parece que substanciosas porciones de ésta merecen la edición en inglés, la *lingua franca* de nuestros días. A título de ejemplo comparativo valgan el libro de D. W. Jordan y P. Smith *Nonlinear Ordinary Differential Equations. An Introduction to Dynamical Systems*, el de Engelbrecht *Nonlinear Wave Dynamics. Complexity and Simplicity*, el de C. Nicolis, *Introduction to Nonlinear Science*, y los varios libros sobre "Synergetics" que H. Haken ha publicado con Springer-Verlag.

En la primera parte, con seis densos capítulos (un apéndice sobre las ideas de Heisenberg sobre la descripción cuántica en física: principio de indeterminación), se presentan ideas, conceptos y técnicas profusamente sazonados con crítica filosófica, correlación entre disciplinas, discusión del papel de las escalas espaciales o temporales de los problemas, etc. Merece particular referencia su mención de las ideas de Gary S. Becker, Nobel de economía a mi entender no justamente valorado en nuestros lares. No me gustan, en cambio, los comentarios elogiosos de los logros del Instituto de Ciencias de la Complejidad de Santa Fe, mucho ruido para pocas nueces.

Muy completa, aunque mejorable si entramos en detalles técnicos, es la descripción que de la teoría del caos (determinista) hace el autor en los capítulos quinto y sexto. Los capítulos siete a nueve dan un bono económico que físicos y matemáticos podrán encontrar muy adecuado para elevar su bagaje cultural científico y atisbar perspectivas. He de confesar que no había tenido tal sensación e inspiración desde la lectura, hace algunos años, de *The General Theory of Employment, Interest and Money*, de J. M. Keynes.

El libro se cierra con un epílogo justificativo de lo que ha ofrecido de *mélange* legítimo de economía, matemáticas, estadística,... y algo de física, subrayando cuán necesario es el diálogo y los intercambios entre científicos de diversas disciplinas para evitar que seamos "barcas que nunca se han de encontrar" porque una vaya río arriba y la otra hacia el mar.

MANUEL GARCÍA VELARDE

vechando el sistema patentado por Samuel F. B. Morse.

Con el tratado de Maxwell sobre la teoría electromagnética, de 1864, se dispone del armazón científico básico. Llegado a manos de Oliver Heaviside, intuyó que debía entenderlo si quería saber qué era la electricidad. Y se aprestó a estudiar cálculo y ecuaciones diferenciales. Así inventó el análisis vectorial y redujo las ecuaciones de Maxwell a las cuatro de los manuales. También Heinrich Hertz halló inspiración en el tratado de Maxwell y produjo ondas electromagnéticas en su laboratorio de Karlsruhe en 1887 y demostró la reflexión, la refracción y la polarización. Pero no salió de los ensayos de laboratorio.

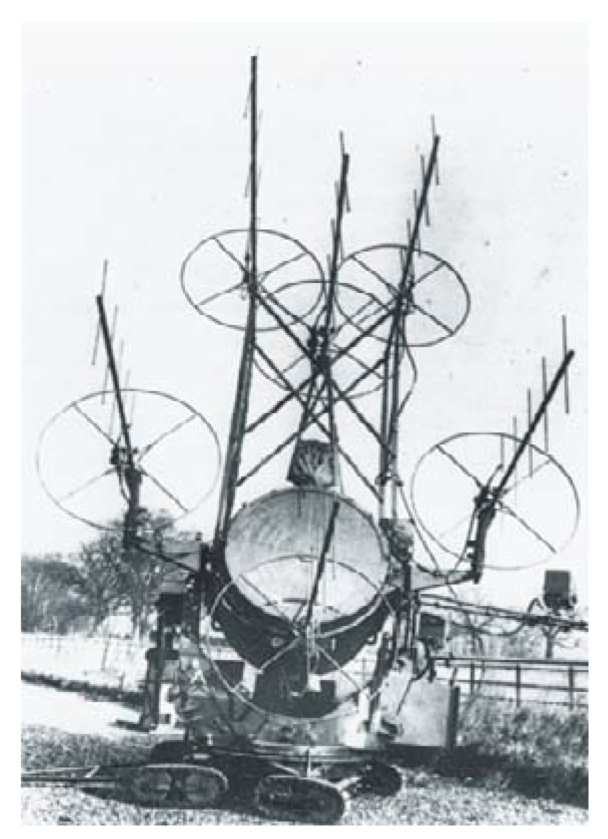
Las ondas electromagnéticas abarcan desde las extraordinariamente cortas (los rayos gamma) hasta las ondas de radio de cientos de kilómetros. Comparten algunas características de propagación con las ondas mecánicas, sísmicas y las superficiales de un líquido. Pero no necesitan medio material para propagarse. Igual que en las ondas mecánicas, cumplen una relación simple entre longitud de onda (distancia entre dos crestas consecutivas), frecuencia (número de crestas que atraviesa un punto dado por segundo) y velocidad de propagación. Cuando una onda, cualquiera que sea, incide sobre una frontera entre dos medios diferentes (aire y agua, por ejemplo), parte de la energía de la onda se refleja y el resto se transmite.

Si la longitud de onda es más corta que el tamaño de la superficie reflectora, la reflexión se parecerá a la del espejo y por eso se llama reflexión especular; si la longitud de onda es equiparable al tamaño del reflector, las ondas se emitirán en una amplia distribución de direcciones. Cuando dos trenes distintos de ondas electromagnéticas salen al encuentro, se produce la suma vectorial de sus campos eléctricos y magnéticos. Dos ondas de la misma longitud de onda se hallan en fase, es decir, las crestas de sus ondas se mueven juntas, aumentan su amplitud combinada; si están desfasadas, decrece su amplitud combinada.

En esos principios halla fundamento una técnica que ha modificado la historia reciente de Europa y se explica en *The Life and Times of A. D. Blumlein* y *A Radar History of World War II*. Blumlein murió trágicamente a los 38 años. En tan breve intervalo de

tiempo realizó decisivas aportaciones a la telefonía y a las mediciones eléctricas, al registro y reproducción monofónicos y estereofónicos, a la televisión de alta resolución y a los sistemas de radar. A sus trabajos se deben la defensa artillera del Reino Unido y la victoria de la batalla del Atlántico durante la segunda guerra mundial.

Ingeniero eléctrico de formación lo contrató muy joven la compañía International Western Electric, donde intervino en el diseño del equipo de medición del teléfono. Para Columbia Graphophone desarrolló un cabezal de grabación de bobina móvil que sustituyó a los sistemas de núcleo de hierro en uso. Con el tiempo diseñó el proceso entero del equipo de grabación, desde el micrófono hasta los amplificadores de potencia. Interesado por la estereofonía (sonido binaural) puso a prueba una línea completa de equipo, desde los micrófonos hasta los altavoces pasando por discos de doble canal y reproductores estereofónicos.



Equipo de radar empleado en la defensa de Inglaterra durante la segunda guerra mundial

Para entender semejante versatilidad técnica de Blumlein hemos de traer a colación los estudios de un ingeniero en los años veinte. Constaba la carrera de tres cursos. En el primero se enseñaba matemática, física, química, dibujo técnico y taller y laboratorio; en el segundo, resistencia de materiales y mecánica, dibujo técnico y motores, técnica eléctrica, matemática y química. Las prácticas de laboratorio, continuas y diversificadas, familiarizaban a los alumnos con dínamos, motores, transformadores, acumuladores, condensadores, lámparas de arco, etcétera; aprendían a medir la intensidad del campo magnético, las propiedades magnéticas del hierro, coeficientes de inducción y calibración de varios parámetros comerciales. En el tercer curso se profundizaba en telegrafía, telefonía, radiotelegrafía y telefonía inalámbrica, principios de máquinas eléctricas, fotometría práctica.

El radar es la técnica que permite determinar la posición de un objeto mediante la iluminación del mismo con ondas de radio y la observación de sus reflexiones. El equipo opera mediante el envío de una señal hacia un objetivo o diana. Esta señal radiada pierde intensidad a la manera de la luz que se aleja de una lámpara incandescente, es decir, en proporción al cuadrado de la distancia. La señal reflejada por el blanco es, por supuesto, una fracción muy pequeña de la señal transmitida, y, lo que todavía es peor, la señal reflejada se halla sometida a la misma ley de propagación que el transmisor. Tenemos, pues, que la señal reflejada que recibe el receptor de radar decrece con la cuarta potencia de la distancia. La única razón de la viabilidad del radar para cualquier intervalo razonable considerada tal disminución estriba en que los transmisores radien cientos de kW y los receptores funcionen con pequeñas fracciones de microW.

Blumlein vio la dificultad de alcanzar un intervalo mínimo aceptable, problema central en que se encontraba la producción de pulsos suficientemente estrechos. El método inicial consistía en formar el pulso de la señal de radiofrecuencia y luego amplificarlo, pero esa amplificación no permitía una subida y bajada del pulso suficientemente rápidas. Blumlein se aprestó a conmutar el alto voltaje directo que alimentaba al oscilador. Su transmisor-modulador redujo el rango mínimo a 130 metros.

Los equipos de radar de la segunda guerra mundial operaban en tres modos: a pulsos, en onda continua y en frecuencia modulada. En el primer caso, la señal de radiofrecuencia producida por el transmisor tiene una duración de brevedad suficiente para formar decenas o como mucho centenas de trenes de ondas de longitud métrica. La velocidad de la luz es tal, que un tren de 30 metros de largo se forma durante un microsegundo de transmisión. Cuando se opera en el modo pulsante, el tiempo entre pulsos suele establecerse de forma que el tiempo de viaje resulte suficiente para el máximo intervalo deseado. Cuanto mayor sea el ritmo de repetición de pulsos, más señales reflejadas habrá disponibles para el análisis.

El radar de onda continua se empleó mucho menos que el radar pulsante porque cuesta mucho más extraer información relativa a la distancia. Resulta empero excelente para medir la velocidad del blanco. Si uno modula una señal transmitida de suerte que su frecuencia cambie con el tiempo, la señal reflejada volverá con una frecuencia diferente de la emitida en ese momento. La mezcla de las dos frecuencias producirá una frecuencia de pulsación igual a la diferencia entre las frecuencias reflejadas y las transmitidas momentáneamente. Tal frecuencia de pulsación puede relacionarse fácilmente con la distancia del blanco. Porque se trata de una operación continua, se necesitan antenas distintas para la transmisión y la recepción.

¿Para qué sirvió el radar en la segunda guerra mundial? Se ha referido su importancia crucial en los ataques aéreos. Menos contado está su papel en el mar. De la refriega del 11/12 de octubre de 1942 se recuerda al menos con bastante claridad su comienzo: el *Boise* abrió fuego en la obscuridad guiándose con el control del radar; sus cañonazos dieron en el blanco ante un enemigo desconcertado. El teniente Philip C. Kelsey identificó los barcos a hundir y el capitán Edward J. Moran maniobró para situarse en posición de fuego; hundieron seis buques de guerra. El almirante nipón envió a Tokio un duro mensaje quejándose de su soledad.

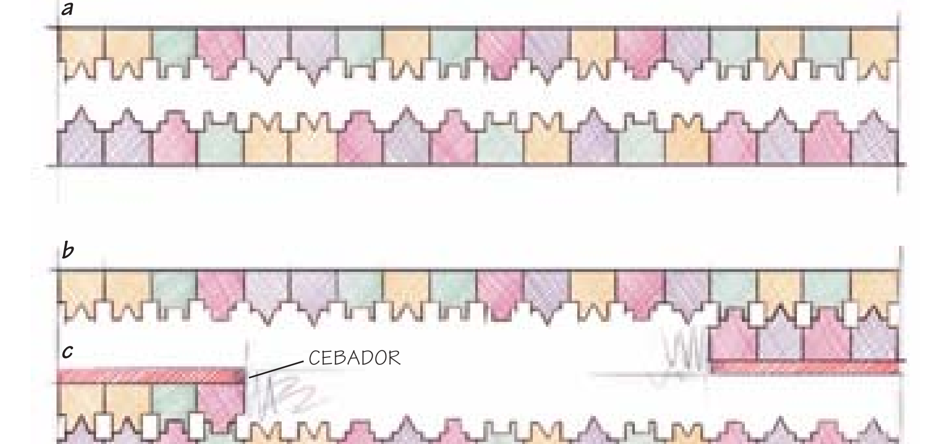
LUIS ALONSO

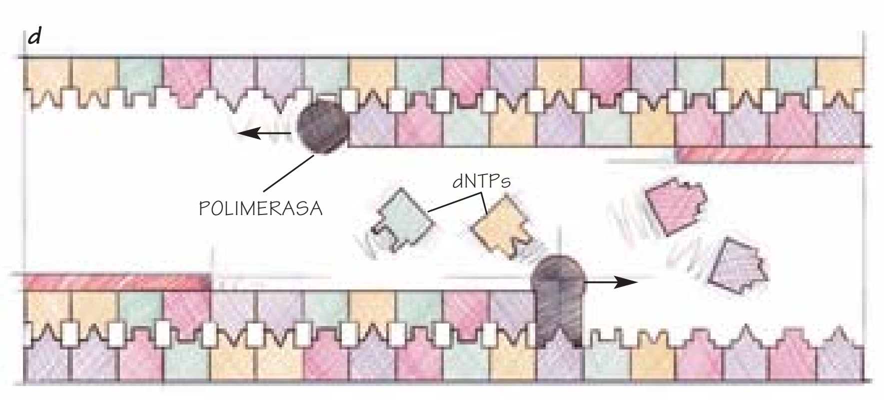
Shawn Carlson

Una receta casera

Creo que Eva Harris ganará en el futuro el Premio Nobel de la paz, galardón que esta soñadora profesora de la Universidad de California en Berkeley merece sin duda por su trabajo, que podría salvar incontables vidas. Se dedica a desarrollar procedimientos baratos para efectuar complicados ensayos médicos, técnicas que luego transfiere a los pueblos subdesarrollados. Su suministro de equipos y de experiencia a las organizaciones sanitarias locales está creando barreras epidemiológicas en torno a peligrosos focos de enfermedad, ayudando a contener los brotes antes de que se transformen en epidemias.

Para ello fundó en San Francisco y en 1998 el Sustainable Sciences Institute, que ya ha logrado algunos éxitos asombrosos. Forma parte de ese esfuerzo la reciente publicación de *A Low-Cost Approach to PCR* (Oxford University Press; ISBN: 0-19-511926-6), manual definitivo sobre técnicas biológicas realizadas de manera económica. Aunque pensado para los profesionales de la sanidad, el libro es una mina para los aficionados de presupuesto limitado. Explica, por ejemplo, de qué modo cualquiera que posea un poco de experiencia puede efectuar la reacción en cadena de la polimerasa (RCP), técnica que permite generar grandes cantidades de ADN.





1. La amplificación de un gen empieza con el ADN de doble hebra (a). *El calor divide las hebras* (b) *y fragmentos cortos de ADN (los cebadores) se fijan a lugares concretos* (c). *La enzima de la polimerasa va uniendo bloques constituyentes del ADN* (dNTPs, representados en amarillo, verde, rosa y púrpura) *a cada hebra, formando dos nuevas cadenas de ADN que complementan las originales. La repetición de estos pasos duplica la cantidad de ADN presente tras cada iteración*

El método RCP desdobla una hélice doble de ADN en dos cadenas complementarias, que están sumergidas en una sopa de bloques constituyentes de ADN. Unas condiciones experimentales correctas les inducen a recomponerse en dos copias de lo que fue originalmente una molécula de ADN. Los pasos necesarios no requieren más que algunos minutos. Y la continuada repetición de las operaciones duplica sucesivamente el número de copias, de modo que 30 ciclos de RCP aumentan mil millones de veces el fragmento de ADN tomado como objeto, "amplificando" lo que pudo empezar como una única molécula para terminar constituyendo una cantidad susceptible de fácil análisis.

Nuestros aficionados pueden hacer la RCP en casa, pero el ejercicio es dificultoso. Para empezar, la misma sensibilidad de la RCP la hace muy vulnerable a la contaminación. Basta con una sola célula díscola para que se malogre el experimento. Un experimentador serio tiene que comprarse el libro de Harris y un texto de bioquímica. Para abrir boca describiremos aquí un ejercicio de RCP que evita la mayoría de los escollos. Y la Society for Amateur Scientists puede proporcionar los productos difíciles de obtener.

Lo primero que se necesita es un poco de nuestro propio ADN y varios tubos de ensayo de Pyrex, estériles y con tapones de caucho; o, mejor aún, unos cuantos tubos de microcentrifugadora, de plástico y con

tapones incorporados. El riesgo de contaminación puede reducirse lavando con lejía todos los recipientes y las superficies de trabajo y llevando siempre guantes de látex. Para conseguir una muestra de ADN, frótese suavemente el interior de la mejilla con un bastoncillo de algodón estéril, luego se pasa suavemente la punta por el interior de un tubo de ensayo que contenga algunos mililitros de agua destilada. Hiérvase el agua a fuego lento durante dos minutos para fragmentar las células y liberar así nuestra impronta genética. La solución contendrá entonces unos cuantos fragmentos de ADN, junto con variadas moléculas de gran tamaño y otros restos procedentes de las células rotas.

Ese caldo biológico se deja enfriar y después, si se puede, se emplea una centrífuga-mezcladora [*véase* "Taller y laboratorio", marzo de 1998] para separar los desechos celulares más grandes. Algunas de las moléculas disueltas pueden interferir con RCP, por lo que los profesionales suelen diluir la solución por factores de 10 y 1000 para reducir la concentración de los ingredientes molestos. Hechos estos preparativos, hay que guardar la muestra en hielo hasta que vaya a emplearse.

El elevado precio de los productos hace que incluso los profesionales usen cantidades increíblemente pequeñas de los distintos reactivos, a menudo un microlitro o menos. Para manejar tan reducidas cantidades hace siempre falta una pipeta calibrada (como la catalogada con el número S346503 por Fisher Scientific, www.fishersci.com, 219 dólares; se necesitan también las puntas desechables, n.º de pieza S346501, que cuestan unos 30 dólares por juego). Pero en su lugar podemos emplear pajas de bebidas de plástico transparente. Introdúzcase el tubito en la solución hasta la profundidad adecuada y colóquese el pulgar tapando su otro extremo para trasvasar el contenido. En las pajas que yo compré en mi tienda de comestibles caben unos 70 microlitros por cada centímetro de longitud. Comprobé que podía trasvasar 70 microlitros de líquido de manera regular (con variaciones de un 4 por ciento, más o menos) y que podía repartir cantidades tan reducidas como cinco microlitros con errores de un 40 por ciento aproximadamente.

La receta de la sopa de la RCP que aquí damos consta de un amortiguador, dos cebadores, una enzima de la polimerasa, bloques constituyentes del ADN (llamados trifosfatos de desoxinucleótidos, dNTP, por su nombre en inglés) y cloruro de magnesio. El amortiguador mantiene constante el *p*H de la reacción. Los cebadores son fragmentos cortos de ADN no desplegados, que se unen a sitios específicos del ADN humano y definen dónde comienza y dónde acaba la copia. La enzima de la polimerasa reúne los bloques constituyentes del ADN y el magnesio de la solución ayuda a mantener en marcha la reacción.

Prepárense varios tubos con esos reactivos. Hay que asegurarse de que uno de ellos no contenga más que los reactivos; es decir, a éste no hay que añadirle ADN. Se lo empleará como control negativo a lo largo del proceso de amplificación, al final del cual no debe haber rastro de ADN alguno en ese vial.

El ciclo de la RCP se inicia escindiendo con calor el ADN. A unos 95 grados Celsius la doble hélice del ADN se desenreda en un minuto aproximadamente. Los tubos de ensayo deben mantenerse taponados (o los microcentrífugos cubiertos) para evitar la evaporación. Seguidamente se baja la temperatura hasta unos 60 grados Celsius durante unos 90 segundos. Esa operación hace que los cebadores se unan a las cadenas de ADN separadas. Luego se eleva la temperatura hasta 72 grados Celsius durante otros 90 segundos, dejando que la polimerasa endurecida por el calor construya las nuevas copias. La polimerasa es una enzima que producen ciertas bacterias que se encuentran en las aguas termales.

Las operaciones de caldeo pueden efectuarse sin complicaciones disponiendo tres baños de agua caliente y transfiriendo los tubos de uno a otro. Yo me limité a poner tres ollas sobre la cocina y vigilé sus temperaturas con termómetros de repostería. Me llevó tres horas hacer pasar mis muestras 30 veces por entre los baños. Dentro de uno de los tubos de ensayo puse un termopar para comprobar el tiempo que le costaba a una solución conseguir la temperatura adecuada (de uno a dos minutos); los diminutos tubos microcentrífugos se equilibran mucho antes.

Al terminar se dispone de grandes cantidades de moléculas de ADN, que pueden clasificarse por tamaño por medio de electroforesis en gel [*véase* "Taller y laboratorio", febrero de 1999]. Durante los ensayos yo empleé tres soluciones y un control negativo. Un investigador más concienzudo añadiría una solución de calibración con fragmentos de ADN de longitud conocida. La comparación de los resultados con la solución de calibración facilitaría la evaluación del tamaño del ADN amplificado.

Tras someter el gel durante una hora a 54 volt (generados con seis pilas de nueve volt), lo teñí con una solución diluida de bromuro de etidio, una peligrosa sustancia mutagénica que se absorbe directamente

Sopa de la RCP

En un tubo de ensayo limpio y estéril se añaden:

100 UMP (unidades mínimas posibles) de agua destilada
15 UMP de amortiguador
8 UMP exactamente de cloruro de magnesio
5 UMP de cada uno de los bloques dNTP
3 UMP de cebador 1 de β-globulina
3 UMP de cebador 2 de β-globulina2
1 UMP de enzima de polimerasa
1 gota de aceite mineral (protege a la polimerasa de la congelación)

La parte no usada se congela, conservándola para su empleo posterior.

2. Receta de la sopa RCP. Requiere mezclar muchos ingredientes en las proporciones especificadas, pero sólo la concentración de cloruro de magnesio es realmente crítica

a través de la piel, por lo que hay que evitar escrupulosamente su contacto. El bromuro de etidio se une directamente al ADN y se torna fluorescente cuando se ilumina con luz ultravioleta (UV). En mi cuarto de baño a oscuras empleé una luz negra ordinaria (de onda larga) para observar las tenues líneas de ADN amplificado. Quienes empleen una luz UV de onda corta verán líneas más luminosas. Los llamados transiluminadores cuestan 195 dólares en Fisher Scientific (n.º de pieza S45157). Pero recuérdese que al trabajar con luz UV de onda corta hay que usar gafas protectoras (como la pieza n.º S47733 de Fisher Scientific, 7 dólares) siempre que esté encendida, para que no dañe a la vista. Quien no esté seguro de su cautela debe limitarse a la luz negra ordinaria.

La posibilidad de realizar RCP en casa abre nuevos y vastos territorios a los aficionados. Quienes sean virtuosos en la aplicación de esta técnica podrían incluso cooperar con el Sustainable Sciences Institute en su lucha contra las enfermedades. En todo caso debería uno informarse de las actividades de tan maravilloso grupo, que estoy seguro de que terminará por recibir los elogios y apoyos generalizados que merece. El comité Nobel tardó casi tres decenios en premiar a la organización francesa Médicos Sin Fronteras. Sólo espero que Eva Harris y sus colegas no hayan de esperar tanto.

Puede obtenerse información sobre el Sustainable Sciences Institute en www.ssilink.org, llamando al 415-431.24.10 o escribiendo a 474 Valencia Street, Suite 120, San Francisco, CA 94103. Para más información acerca de este y de otros proyectos para aficionados, dése un paseo por el sitio Web de la Society for Amateur Scientists, www.sas.org, y pulse el botón "Forum". Como servicio a los lectores, la sociedad ofrece un equipo de prácticas de RCP, que contiene todas las sustancias necesarias, guantes de látex y recipientes para las muestras. Cuesta 40 dólares. Como el bromuro de etidio es un mutágeno, no puede venderse más que a personas adultas. La sociedad también puede proporcionar un juego de electroforesis por 60 dólares. Puede llamarse al teléfono 619-239.88.07 o escribir a 4735 Clairemont Square PMB 179, San Diego, CA 92117.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



¿SON ECOLOGICOS LOS PLASTICOS VERDES?, por Tillman U. Gerngross y Steven C. Slater

La técnica permite elaborar plásticos a partir de plantas en vez de utilizar combustibles fósiles no renovables. Pero, ¿es ésa la ansiada solución frente a la degradación del entorno?

LOS PRIMEROS DIAS EN LA VIDA DE UNA ESTRELLA, por Thomas P. Ray

Si, para crear una estrella, deben el gas y el polvo caer hacia el interior, ¿por qué los astrónomos observan corrientes de materia hacia el exterior?

¿PERJUDICA A LA SALUD EL CALENTAMIENTO GLOBAL?, por Paul R. Epstein

Los modelos informáticos sugieren que muchas enfermedades se exacerbarán al calentarse la atmósfera terrestre. Ya han comenzado a aparecer indicios de los problemas anunciados.

DANDO FORMA CON FUEGO, por Arvind Varma

Ondas de calor que se propagan por sí mismas pueden engendrar nuevos y mejores materiales. La investigación ha descubierto por fin formas de examinar estas reacciones químicas ultrarrápidas.

LOS CIRCUITOS NERVIOSOS DEL SEXO MASCULINO, por Irwin Goldstein y Equipo de Investigación de los Mecanismos Centrales de la Disfunción Eréctil

El control de la erección se fragua en el cerebro del hombre.

DIMENSIONES INVISIBLES DEL UNIVERSO, por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali

Puede que el universo visible se extienda en una membrana que flota en un espacio con más dimensiones. Estas unificarían las fuerzas de la naturaleza y podrían contener universos paralelos.

LA ESPADA DEL CID, por Antonio José Criado, Juan Antonio Martínez, José Manuel Jiménez y Rafael Calabrés

La hoja de la supuesta Tizona, la espada del Cid, pertenece al siglo XI. Su estructura está formada por un acero suave en el interior y otro duro en la capa externa.

ORIGEN DE LA DIETA MODERNA, por Rachel Laudan

A veces nos preguntamos por qué se sirven los dulces al final de la comida. Los orígenes de la cocina occidental pueden rastrearse en ideas que acerca de la dieta y la nutrición se esbozaron en el siglo XVII.

